

Université de Montréal

**Effets d'un programme de réadaptation fondé sur les exercices neurodynamiques ciblant
l'excursion du nerf médian offert à des individus atteints du syndrome du tunnel carpien**

par
Philippe Paquette

Sciences de la réadaptation, École de réadaptation

Faculté de Médecine

Thèse présentée
en vue de l'obtention du grade de Philosophiae Doctor (PhD)
en Sciences de la réadaptation

Janvier 2019

© Philippe Paquette, 2019

Résumé

Les exercices neurodynamiques sont fréquemment recommandés par les physiothérapeutes pour améliorer la douleur et la fonction chez des individus atteints du syndrome du tunnel carpien (STC). Toutefois, l'efficacité de ces exercices demeure incertaine considérant que leurs mécanismes thérapeutiques reposent largement sur des bases théoriques. En fait, peu d'études ont rapporté quantitativement les effets des exercices neurodynamiques sur l'intégrité biologique et les propriétés biomécaniques du nerf médian au poignet (*effets périphériques*) et sur la structure et la fonction des aires corticales motrices (*effets centraux*). Les objectifs principaux de cette thèse étaient 1) d'évaluer les qualités psychométriques des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie, 2) de caractériser les adaptations périphériques et centrales potentiellement liées à la performance des exercices neurodynamiques et 3) d'évaluer la faisabilité et l'efficacité d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offerts à des individus atteints du STC. Pour répondre à ces objectifs, quatre projets distincts ont été menés : Projet n°1 : La fidélité test-retest et le changement minimal détectable des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian ont été quantifiés chez un groupe de 11 individus asymptomatiques et sept individus atteints du STC. Projet n°2 : La validité concourante entre les mesures de l'excursion longitudinale d'un modèle artificiel de nerf médian obtenues à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie et d'un système tridimensionnel d'analyse de mouvement a été évaluée. Projet n°3 : Une étude clinique exploratoire a été réalisée pour évaluer les effets périphériques et centraux d'un programme d'exercices neurodynamiques auprès d'une cohorte de 14 individus atteints du STC. Projet n°4 : Une étude clinique pilote randomisée a été réalisée pour évaluer la faisabilité d'un programme d'exercices neurodynamiques préopératoire exécuté par 15 individus atteints du STC en attente d'une première chirurgie de décompression et évaluer l'efficacité de ce programme chez ces mêmes individus pour améliorer l'intégrité biologique, les propriétés biomécaniques du nerf médian; réduire la douleur, les déficiences sensorimotrices et optimiser la capacité fonctionnelle du membre supérieur en comparaison à un groupe contrôle de 15 individus atteints du STC ne complétant aucun programme d'exercice avant et après la chirurgie (approche actuelle). En résumé, les résultats des projets n°1 et 2 soutiennent que

l'imagerie quantitative par ultrasonographie est un outil fidèle et valide pour mesurer l'intégrité biologique et l'excursion longitudinale du nerf médian. Les résultats du projet n°3 suggèrent que les changements cliniques observés suite aux exercices neurodynamiques potentialisent les adaptations centrales alors qu'ils n'ont aucun ou peu d'effets sur les adaptations périphériques, notamment l'excursion du nerf médian. Les résultats du projet n°4 démontrent que, bien que le programme d'exercices neurodynamiques proposé soit faisable et relativement sécuritaire lorsqu'offert à des individus en attente d'une chirurgie de décompression, ils ne démontrent pas la supériorité du programme proposé sur l'amélioration des déficiences sensorimotrices, de la douleur et des capacités fonctionnelles des membres supérieurs chez les patients atteints de STC immédiatement avant ou un mois après une opération de décompression du canal carpien par rapport à l'approche actuelle. Certains résultats, démontrant des tailles d'effet modérées à importantes ou qui tendaient vers le seuil statistiquement significatif, appuient toutefois la pertinence de poursuivre les efforts de recherche.

Mots-clés : Douleur ; Exercices neurodynamiques ; Fonction du membre supérieur ; Physiothérapie ; Syndrome du tunnel carpien.

Abstract

Neuromobilizations exercises are frequently advocated by physiotherapists to improve pain and function in individuals with Carpal Tunnel Syndrome (CTS). However, the effectiveness of these exercises remains uncertain since they remain in most part based on theoretical and empirical foundations. In fact, few studies have reported the effects of neurodynamic exercises on the biological integrity and biomechanical properties of the median nerve at the wrist (*peripheral adaptations*) and on the structure and function of cortical motor areas (*central adaptations*). The main objectives of this thesis were 1) to evaluate the psychometric properties of median nerve longitudinal excursion measurements using quantitative ultrasound imaging, 2) to characterize the peripheral and central adaptations potentially linked to the performance of neuromobilization exercises and 3) to evaluate the feasibility and effectiveness of a neuromobilization exercise program completed by individuals with CTS. To meet these objectives, four separate projects were conducted. Project # 1: Test-retest reliability and minimal detectable change in median longitudinal nerve excursion measurements were evaluated in a group of 11 asymptomatic individuals and seven individuals with CTS. Project # 2: The concurrent validity between longitudinal excursion measurements of an artificial median nerve model obtained with quantitative ultrasound imaging and a three-dimensional motion analysis system was evaluated. Project # 3: An exploratory clinical study was conducted to evaluate the potential peripheral and central adaptations following completion of a neuromobilization exercise program in a cohort of 14 individuals with CTS. Project # 4: A pilot randomized clinical trial was conducted to evaluate the feasibility of a preoperative neuromobilization exercise program performed by 15 individuals with CTS awaiting decompression surgery and to evaluate the efficacy of this program for these same individuals to improve the biological integrity, biomechanical properties of the median nerve; reduce pain, sensorimotor deficiencies and optimize upper limb functional capacity compared to a control group of 15 individuals with CTS that does not perform any exercise program before and after carpal surgery (standard care).

In summary, the results of projects # 1 and 2 demonstrate that ultrasound imaging is a reliable and valid tool for measuring the biological integrity and longitudinal excursion of the

median nerve. The results of project # 3 suggest that the clinical changes observed following neuromobilization exercises potentiate central adaptations while they have no or little effect on peripheral adaptations, including nerve excursion. The results of project # 4 demonstrate that, although the proposed neuromobilization exercise program is feasible and relatively safe when completed by individuals awaiting decompression surgery, they do not demonstrate the superiority of the proposed program in improving sensorimotor impairments, pain and upper extremity functional abilities in individuals with CTS immediately before or one month after carpal tunnel decompression surgery compared with standard care. However, pain subscales and biological integrity outcomes demonstrated moderate to large effect sizes or trends towards the statistically significance, thus supporting the need for further research.

Keywords : Carpal tunnel syndrome ; Musculoskeletal manipulations ; Pain ; Physical therapy ; Upper limb functional capabilities.

Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures.....	xii
Liste des sigles et abréviations	xvi
Remerciements	xviii
1. INTRODUCTION	1
2. RECENSION DE LA LITTÉRATURE	4
2.1. Anatomie et physiologie du nerf médian : implication pour le syndrome du tunnel carpien.....	4
2.1.1. Anatomie générale du tunnel carpien	4
2.1.2. Anatomie générale du nerf médian.....	6
2.2. Revue des propriétés biomécaniques des nerfs périphériques.....	9
2.2.1. La capabilité de déformation du nerf médian	10
2.2.2. La capabilité d'excursion du nerf médian.....	11
2.2.2.1. L'amplitude et la direction de l'excursion	12
2.2.2.2. L'excursion est en étroite relation avec la capabilité de déformation	13
2.3. Le syndrome du tunnel carpien.....	15
2.3.1. Perspective historique	15
2.3.2. Présentation clinique.....	15
2.3.3. Facteurs de risque	16
2.3.4. Pathophysiologie du STC	17
2.3.4.1. Mécanismes périphériques impliqués dans le STC	18
2.3.4.2. Mesures des mécanismes périphériques par imagerie quantitative par ultrasonographie.....	20
2.3.4.3. Mécanismes centraux impliqués dans le STC	22
2.3.4.4. Mesures des mécanismes centraux par stimulation magnétique transcrânienne	23

2.3.5.	Diagnostic	24
2.4.	Inventaire des interventions thérapeutiques.....	25
2.5.	Les exercices neurodynamiques	26
2.5.1.	Description et concepts théoriques	26
2.5.2.	Différents types de mobilisations neurodynamiques et leurs effets sur les propriétés biomécaniques de nerfs périphériques.....	28
2.5.3.	L'efficacité des exercices neurodynamiques	30
3.	OBJECTIFS	33
3.1.	Objectif général de la thèse.....	33
3.2.	Objectifs spécifiques de la thèse.....	33
4.	MÉTHODE.....	35
4.1.	Plan du déroulement du doctorat	35
4.2.	Cadre conceptuel.....	37
4.3.	Les participants à l'étude et stratégies de recrutement	37
4.4.	Évaluations.....	39
4.4.1.	Questionnaires	40
4.4.2.	Mesure des déficiences sensorimotrices	40
4.4.3.	Mesures par ultrasonographie.....	42
4.4.3.1.	Protocole d'imagerie.....	43
4.4.3.2.	Analyse des images statiques.....	44
4.4.3.3.	Analyse des images dynamiques	45
4.4.4.	Mesures par stimulation magnétique transcrânienne.....	46
4.4.4.1.	Protocole de stimulation et analyse des signaux.....	47
4.5.	Analyses statistiques	49
5.	RÉSULTATS.....	50
5.1.	Article n°1: Repeatability and Minimal Detectable Change of Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging	51
5.1.1.	Avant-propos	52
5.1.2.	Abstract.....	53
5.1.3.	Introduction.....	54

5.1.4.	Materiel and Methods	54
5.1.4.1.	Participants.....	54
5.1.4.2.	Laboratory Assessment.....	55
5.1.4.3.	Main outcome measure	55
5.1.4.4.	Statistics	56
5.1.5.	Results.....	56
5.1.6.	Discussion.....	57
5.1.7.	Conclusion	57
5.1.8.	Acknowledgements:.....	58
5.1.9.	References.....	64
5.2.	Article n°2: Comparison of Longitudinal Excursion of a Nerve-Phantom Model Using Quantitative Ultrasound Imaging and Motion Analysis System Methods: A Convergent Validity Study	65
5.2.1.	Avant-propos	66
5.2.2.	Abstract.....	67
5.2.3.	Introduction.....	68
5.2.4.	Methods	69
5.2.5.	Results.....	72
5.2.6.	Discussion.....	72
5.2.7.	Conclusion	73
5.2.8.	Acknowledgement	74
5.2.9.	References.....	75
5.3.	Article n°3: Peripheral and central adaptations following a median nerve neuromobilization program completed by individuals with carpal tunnel syndrome: An exploratory mechanistic study using musculoskeletal ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation	81
5.3.1.	Avant-propos	82
5.3.2.	Abstract.....	83
5.3.3.	Introduction.....	84
5.3.4.	Materials and Methods.....	86
5.3.4.1.	Participants.....	86

5.3.4.2.	Assessments and outcome measures.....	87
5.3.4.3.	Intervention.....	90
5.3.4.4.	Statistical analysis.....	90
5.3.5.	Results.....	91
5.3.6.	Discussion.....	92
5.3.6.1.	Neuromobilization exercises alleviate pain and optimize upper limb functional abilities.....	92
5.3.6.2.	Neuromobilization exercises may alter median nerve integrity and longitudinal excursion.....	93
5.3.6.3.	Neuromobilization exercises modifies corticospinal excitability.....	94
5.3.6.4.	Clinical significance.....	94
5.3.7.	Limits.....	95
5.3.8.	Conclusions.....	96
5.3.9.	Funding Statement.....	96
5.3.10.	Acknowledgments.....	96
5.3.11.	References.....	97
5.4.	Article n°4: Effects of a preoperative neuromobilization program offered to individuals with carpal tunnel syndrome awaiting carpal tunnel decompression surgery: a pilot randomized controlled study.....	107
5.4.1.	Avant-propos.....	108
5.4.2.	Abstract.....	109
5.4.3.	Introduction.....	110
5.4.4.	Method.....	111
5.4.4.1.	Trial design and randomization.....	111
5.4.4.2.	Participants.....	112
5.4.4.3.	Intervention.....	112
5.4.4.4.	Outcomes measures.....	113
5.4.4.5.	Statistical analyses.....	116
5.4.5.	Results.....	116
5.4.5.1.	Feasibility.....	116
5.4.5.2.	Efficacy.....	117

5.4.6.	Discussion.....	118
5.4.6.1.	Limits	121
5.4.7.	Clinical messages.....	121
5.4.8.	Acknowledgements.....	122
5.4.9.	References.....	122
5.4.10.	Figure Legends	130
6.	DISCUSSION	135
6.1.	Synthèse des constats des travaux de recherche	136
6.1.1.	Qualités psychométriques des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian.....	136
6.1.1.1.	Fidélité et changement minimal détectable.....	136
6.1.1.2.	Validité convergente	137
6.1.2.	Effet d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offert à des individus atteints du STC	139
6.1.2.1.	Exploration des adaptations périphériques et centrales suivant un programme d'exercices neurodynamiques à domicile.....	139
6.1.2.2.	Faisabilité et efficacité d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offerts aux individus atteints du STC en attente d'une chirurgie de décompression	141
6.2.	Limites des projets de recherche.....	144
6.2.1.	Limites liées à l'échantillon de la population	144
6.2.2.	Limites liées aux outils de mesures et aux traitements des données ..	144
6.3.	Implications pour la pratique clinique	145
6.4.	Avenues de recherche future.....	146
6.4.1.	Court terme	147
6.4.2.	Moyen et long termes	147
6.4.2.1.	Études comparatives	147
6.4.2.2.	Études randomisées.....	148
7.	CONCLUSION	149
8.	BIBLIOGRAPHIE.....	152
	Annexe I : Certificats d'éthique.....	i

Annexe II : Formulaires de consentement.....	vi
Annexe III : Résultats complémentaires du projet #4.....	xxxiii
Annexe IV : Fondements mathématiques des mesures extraites par imagerie quantitative par ultrasonographie.....	xl

Liste des tableaux

Tableau I.	Profil des traitements conservateurs entrepris par les médecins omnipraticiens auprès d'individus atteints du syndrome du tunnel carpien en attente d'une première chirurgie de décompression dans certaines communautés occidentales	3
Tableau II.	Amplitudes d'excursion longitudinale du nerf médian mesurées à l'aide de l'imagerie par ultrasonographie recensées dans la littérature	14
Tableau III.	Facteurs de risques du STC	17
Tableau IV.	Méta-analyse de l'efficacité des exercices neurodynamiques sur la douleur et les capacités fonctionnelles du membres supérieures chez des individus atteints du STC. Tiré de Basson <i>et al.</i> (2017).....	31
Tableau V.	Évaluation des seuils de perception tactile (tiré de Raji et al.(2014)).....	41
Tableau VI.	Évaluation du test de discrimination deux points (tiré de la American Society of Hand Therapist (<i>Magee, 2008</i>))	41
Tableau VII.	Results of the G-Study showing the magnitude of variance components expressed as a percentage of the total variance for each source of variance and interactions for all ULNTs assessed.	59
Tableau VIII.	Results of the D-Study obtained with different designs involving 1 or an average of 2 or 3 images measured during 1 or 2 visits. Bold results indicate those which achieved good test-retest reliability ($\Phi \geq 0.75$) and accuracy ($SEM_{REL} \leq 15\%$).	60
Tableau IX.	Demographic, history and physical examination of participants	101
Tableau X.	Summary of outcome measures	102
Tableau XI.	Demographic information of study participants.....	127
Tableau XII.	6-item participant-feedback questionnaire obtained from participants (n=9) who completed the program.....	128
Tableau XIII.	Pilot analysis of the effects of the neuromobilization exercise program	129
Tableau XIV.	Seuil de sensibilité au pouce	xxxiv
Tableau XV.	Discrimination deux-points du pouce	xxxv

Liste des figures

Figure 1.	Illustration du contenu du tunnel carpien d'après Netter (2014, p. 434)	6
Figure 2.	Illustrations anatomiques des couches de tissus conjonctifs du nerf médian d'après Topp & Boyd (2006) A = artère, BL = <i>basal lamina</i> , Cap = capillaires, Col = collagène, En = endonèvre, Ep = épinerve, Pe = périnerve	8
Figure 3.	Sections transverses d'un fascicule nerveux du nerf sciatique chez le rat démontrant une veinule traversant le périnerve, tiré de Riccardo Luchetti and Amadio (2002, p. 31)	9
Figure 4.	Courbe de tension / élongation d'un nerf périphérique tirée de topp & boyd (2006)	11
Figure 5.	Les mécanismes périphériques impliqués dans le syndrome du tunnel carpien et leurs interactions	20
Figure 6.	Images par ultrasonographie dans le plan transverse chez un individu atteint du STC obtenu a , en proximal du site de compression au niveau du radius et b , en proximal du tunnel carpien. Notez les différences perceptibles de la géométrie, de la composition et de l'organisation du nerf médian. Représentations correspondantes du nerf médian présentée en c et d . Tiré de Bianchi et Martinoli (2007, p. 106) ..	22
Figure 7.	Manœuvres d'ULNT 1 et 2M. Tirées de (Butler, 1991), p.83	27
Figure 8.	Exemple de technique de glissement (a) et de tension (b)	29
Figure 9.	Exemple d'exercices de mobilisations neurodynamiques tiré du protocole de mobilisation de tendons et du nerf médian de Totten et Hunter (1991).	30
Figure 10.	Chronologie et développement des projets, ainsi que les articles scientifiques qui constituent cette thèse	36
Figure 11.	Cadre conceptuel de la CIF	37
Figure 12.	Schéma des différents devis expérimentaux ainsi que des principales mesures de résultats utilisés dans le cadre de cette thèse.....	39
Figure 13.	Photo du protocole d'imagerie, notez la position standardisée du membre supérieur	43

Figure 14. Images a) transverse et b) longitudinale du nerf médian au niveau du tunnel carpien par ultrasonographie. Notez la délimitation des ROIs en vert sur le contour du nerf médian.....	44
Figure 15. Analyses des images statiques du nerf médian par ultrasonographie incluant les mesures géométriques, les mesures de la composition et de texture	45
Figure 16. Analyse de l'excursion du nerf avec a) les ROIs manuellement sélectionnées le long du nerf médian avec le déplacement correspondant des pixels et b) le tableau des résultats	46
Figure 17. a) Illustration démontrant l'application d'une bobine de SMT au-dessus de la région corticale correspondante à l'aire motrice primaire de la main et b) le potentiel moteur évoqué correspondant tel qu'enregistré en laboratoire où l'amplitude est extraite de la distance entre les pics identifiés par la parenthèse. Tiré de (Vucic, Ziemann <i>et al.</i> , 2013). Lat = latence, Dur = durée, P-P = distance pic-à-pic, Sur = surface.	49
Figure 18. Schematic representation of the ULNT sequences showing contralateral neck side flexion with simultaneous wrist extension (tensioners) performed at (A) 45° of shoulder abduction and (B) 90° of shoulder abduction as well as ipsilateral neck side flexion with simultaneous wrist extension (sliders) performed at (C) 45° of shoulder abduction and (D) 90° of shoulder abduction.	61
Figure 19. Musculoskeletal ultrasound image of the longitudinal view of the median nerve over which three distinct regions of interest (ROIs) are manually outlined alongside the median nerve before being tracked using a computerized image analysis program developed using MATlab toolboxes to quantify its longitudinal excursion.	61
Figure 20. This figure shows a schematic of the experimental setup with the ultrasound probe supported over the nerve-phantom model. The nerve-phantom model was aligned with the X' axis of the calibrated 3D orthogonal coordinate system of the laboratory and the quantitative ultrasound system. The nerve-phantom was manually moved predominantly alongside the X' axis.	77
Figure 21. This figure shows an ultrasound image acquisition of the nerve-phantom model. Note the clear upper and lower margins of the rod (white arrows) approximating the hyperechoic appearance of the epineurium of a peripheral nerve and the internal	

constitution composed of organised grey shade variation cause by small crack formation within the polymer's matrix.	77
Figure 22. Scatterplot diagram showing correlation between longitudinal nerve-phantom excursions measured by ultrasound and motion analysis system (Fig. 22a), a Bland-Altman plot with 95% agreement limits (Fig. 22b) and a scatter plot showing correlation between the nerve excursion differences between the two methods (quantitative ultrasound imaging (QUI) method – motion analysis method) and velocity of the glides (Fig. 22c).	77
Figure 23. Neuromobilization program. Note that the starting positions for week one and two are identical.	103
Figure 24. (a) Upper limb disabilities and (b, c, d, e, f) pain domain measurement showing scores before and after completion of the neuromobilization program. Significant differences (marked by asterisks) were found for the upper limb disabilities (DASH: $z = -2.41$, E.S. = 0.46, $p = 0.02$), pain interference and support (WHYMPI: interference $z = -2.98$, E.S. = 0.56, $p < 0.01$; support $z = -2.12$, E.S. = 0.40, $p = 0.03$), while pain severity, life-control and affective distress measures remained similar. Plain dots represent outliers. E.S. = effect size	103
Figure 25. (a) Recruitment curves showing Motor Evoked Potentials (MEP) expressed as a ratio between MEP amplitude and maximal compound muscle action potential (Mmax) plotted against different stimulus intensity proportional to the resting motor threshold. A significant increase in MEP amplitude is noted following completion of the neuromobilization program identified by an asterisk.	103
(b) Inter-individual differences for each transcranial magnetic stimulation intensity after completion of the neuromobilization program. Individuals who reported significant improvement in upper limb function and pain are identified with black dots. Note that some points may overlap.	103
Figure 26. Handout of the neuromobilization exercise program given to participant allocated to the experimental group. Each following exercise of the week of the program was design to include progressions by incorporating movements that required a greater range of nerve excursion and were implemented weekly according to participant's response.	130

Figure 27. a) Ultrasound images of the median nerve at the distal forearm were three regions of interest (ROIs; see blue boxes) are manually selected alongside the nerve. Note that the smaller yellow boxes indicate the center coordinates of each ROI. b) Cross-correlation algorithm output presenting the mean excursion of the nerve. Note that the software breaks the dynamic recording in multiple still frames (usually around 200 frames) depending on the duration of acquisition. The excursion is calculated from the mean hypotenuse of the horizontal and vertical excursion of each ROI. A positive result indicates that the direction occurred to the right of the image, in this case indicating a distal excursion.....	130
Figure 28. CONSORT Flow chart summary of enrollment, screening, allocation, follow-up, and analysis for the study.....	130
Figure 29. Efficacy outcomes measures presenting the analysis of variance between experimental and control groups at the different assessment times (2 groups X 3 times).....	130

Liste des sigles et abréviations

3D	Tridimensionnel
4D	Quatrième dimension
CHUM	Centre hospitalier de l'Université de Montréal
CMD/MDC	Changement minimal détectable / Minimal Detectable Change
DASH	Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand
IQUS/QUI	Imagerie quantitative par ultrasonographie / Quantitative ultrasound imaging
MEPs	Motor Evoke Potentials
NEP	Neuromobilization exercise program
rMT	Resting Motor Threshold
ROIs	Regions of interest
SEM	Standard error of measurement
STC/CTS	Syndrome du tunnel carpien / Carpal Tunnel Syndrome
WHYMPI	West Haven-Yale multidimensional pain inventory

*À mes parents pour votre support indéfectible, pour vos encouragements, et pour m'avoir
ouvert toutes les possibilités dans la vie*

Remerciements

L’auteur tient à adresser ses premiers remerciements envers Prof. Dany Gagnon, directeur du projet de recherche, pour avoir cru en mes capacités, pour la richesse et la rigueur de son enseignement, pour son dévouement envers ses étudiants, mais aussi pour les grandes leçons de vie, un mentor exceptionnel. Des remerciements sincères sont adressés à Prof. Johanne Higgins, codirectrice du projet de recherche, pour son apport stimulant à la réalisation des travaux de cette thèse, pour l’assiduité et la justesse de ses commentaires et pour sa vocation contagieuse envers la recherche. Aussi, je tiens à souligner la généreuse contribution de Dr Martin Lamontagne à la réalisation des différents projets de cette thèse ainsi que son enthousiasme à partager son expertise.

Merci aux Fonds de recherche santé du Québec (FRQS) pour la bourse de formation obtenue dans le cadre de mes études doctorales. Merci également au Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR) et le programme des Sciences de la réadaptation de l’Université de Montréal pour leurs généraux programmes de bourses et de support financier. Enfin, merci au partenariat entre l’Ordre professionnel de la physiothérapie du Québec (OPPQ) et le Réseau provincial de recherche en adaptation-réadaptation (REPAR) d’avoir accepté de financer les projets de recherche inclus dans cette démarche d’études doctorales.

Merci à l’équipe du laboratoire de Pathokinésiologie du CRIR, particulièrement à l’appui de MM. Michel Goyette, ingénieur, Youssef El Khamlichi, ingénieur, Philippe Gordou, ingénieur, Hakim Mecheri, ingénieur, et Daniel Marineau, technicien en électronique pour leur aide dans la mise au point du montage expérimental et des programmes informatisés d’analyse de données inhérentes à cette étude.

Merci à l’équipe soignante et de support du service de chirurgie plastique, ainsi que celles du service de psychiatrie et de physiothérapie du centre hospitalier de l’Université de Montréal. Plus particulièrement, merci aux chirurgiens plastiques Dr Michel Alain Danino, Dr Patrick Harris, Dr Ali Izadpanah, Dr Joseph Bou-Merhi pour leur contribution à la réussite de cette thèse. Merci à Mme Danielle Soucy, physiothérapeute et M. Denis Lévesque, physiothérapeute, gestionnaires du service de physiothérapie pour leur aide considérable pour

leur support avec les horaires. Merci également à Mme Josée Arseneault, ergothérapeute, pour sa capacité hors du commun à expliquer le fonctionnement des services du centre hospitalier universitaire de l'Université de Montréal. Un merci tout particulier à Dre Maria Kandiliotis, alors résidente au programme de physiatrie, pour son assistance clinique au début de cette thèse.

Merci à mes collègues de la clinique Stadium PhysiOstéo ainsi que de la clinique de physiothérapie Pierre-Boucher. Un merci tout particulier à Mmes Raymonde Fortin et Charlen Berry, ainsi que MM. Gilles Messier et Éric Homier qui accomplissent un travail exceptionnel et qui m'engagent par leur générosité et leurs connaissances à me dépasser chaque jour.

Merci à mes collègues d'Université pour les réflexions, les échanges constructifs, les doléances libératrices. Un merci tout particulier à Carole Miéville, ma marraine de recherche, et également à Cindy Gauthier, Simon Décary, Mathieu Lalumière, Katherine Montpetit-Tourangeau, je vous tiens tous en haute estime.

Merci à mes amis, les nouveaux comme les plus anciens, particulièrement mes confrères David L Marcoux, Philippe Bizien, André Darvau de la cohorte 2007-2011 du programme de physiothérapie de l'Université de Montréal.

Finalement merci à Julie-Anne Savard qui est entrée dans ma vie à un moment opportun. Merci pour tous ces petits moments du quotidien qui me font oublier mon stress. Ton écoute, ta candeur et même ton amour me rendent heureux. La fin de cette thèse marque le début de notre aventure.

1. INTRODUCTION

Selon l'Organisation mondiale de la santé, les problèmes musculosquelettiques représentent la deuxième cause d'incapacité au monde (VosFlaxman *et al.*, 2012). Le syndrome du tunnel carpien (STC) est l'un des problèmes musculosquelettiques les plus communs avec une prévalence estimée entre 3,8 % et 16 % dans la population générale (Atroshi, Gummesson *et al.*, 1999; de Krom, Knipschild *et al.*, 1992; Ferry, Pritchard *et al.*, 1998; Tanaka, Wild *et al.*, 1994). Ce syndrome se manifeste principalement chez une population adulte suivant une distribution bimodale caractérisée respectivement par des pointes d'incidence à 50 ans et à 75 ans (Ibrahim, Khan *et al.*, 2012). Les femmes sont plus à risque de développer un STC par rapport aux hommes dans une proportion de 3 : 1 (Ibrahim *et al.*, 2012). Les individus plus âgés sont plus susceptibles de présenter des symptômes sévères avec une dénervation des muscles de la loge thénarienne (J. D. P. Bland & Rudolfer, 2003). Au Québec, les données épidémiologiques sur le STC proviennent essentiellement du Service de la statistique de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). Selon ces données, on constate que les travailleurs québécois indemnisés pour un STC représentaient 3,6 % de l'ensemble des lésions professionnelles du système musculosquelettique entre 2008 et 2011 (Lamarche, Aubin *et al.*, 2012). Ces données témoignent que la prévalence du STC au Québec est similaire à celle d'autres pays industrialisés.

Évaluation de l'impact social

Le STC cause un fardeau économique considérable pour la société, notamment en raison de coûts directs et indirects. Les coûts directs sont associés à l'épisode de soins où la chirurgie de décompression du tunnel carpien occupe un poste de dépense substantiel. Aux États-Unis et en Grande-Bretagne, l'incidence de cette chirurgie est estimée entre 71 à 74 cas par 100 000 individus (F. D. Burke, Ellis *et al.*, 2003; Foley, Silverstein, & Polissar, 2007). Selon les données américaines, ces chirurgies entraînent des dépenses de l'ordre de deux milliards de dollars américains (Ibrahim *et al.*, 2012). Les coûts indirects touchent les employeurs, en raison de la perte de productivité, de l'indemnisation et du remplacement des employés absents (Foley,

Silverstein, & Polissar, 2007; Katz, Losina *et al.*, 2001). Au Québec, les données sur la productivité et l'absentéisme au travail provenant de la CNESST illustrent que les individus avec un STC se sont absents en moyenne 100,4 jours alors que la moyenne d'absence pour l'ensemble des conditions musculosquelettiques est de 74,0 jours (Lamarche *et al.*, 2012). Pour les individus atteints du STC, les conséquences se traduisent par une restriction de la participation aux activités familiales et sociales, un impact négatif sur l'environnement et l'unité familiale de même que des pertes salariales équivalant à la moitié du salaire annuel à moyen terme (Foley, Silverstein, & Polissar, 2007).

Défi de la prise en charge actuelle

L'épisode de soins d'un individu qui présente des signes et symptômes compatibles avec un STC est caractérisé par une forte médicalisation ainsi qu'une sous-utilisation des traitements conservateurs (non chirurgicaux). Au Québec, la prise en charge de ces individus est principalement assurée par les médecins omnipraticiens qui sont en première ligne. Ainsi, l'omnipraticien qui suspecte un STC chez un individu pourra entreprendre un traitement conservateur. De nombreuses options non chirurgicales sont disponibles pour le traitement du STC telles que des modifications ergonomiques, des attelles au poignet, des ultrasons thérapeutiques, des thérapies complémentaires, ainsi que des techniques et exercices de mobilisation ciblant les nerfs périphériques (exercices neurodynamiques) et les tissus mous adjacents (Page, O'Connor *et al.*, 2012; Shi, Bobos *et al.*, 2018). Curieusement, les traitements conservateurs initiés par les médecins se résument presque uniquement à la prescription de médicaments anti-inflammatoires, le port d'attelle du poignet et l'infiltration de cortisone au poignet (Tableau I). Or, l'efficacité des médicaments anti-inflammatoires n'est pas supportée par la littérature (J. D. Bland, 2007). Quant au port d'attelle et les infiltrations de cortisone, ils sont efficaces à court terme, mais associés à une récurrence des symptômes (J. D. Bland, 2007; F. D. Burke, Bradley *et al.*, 2007; Shi *et al.*, 2018). De surcroît, un peu plus de 30 % d'individus ne reçoit aucune forme de traitement conservateur avant d'être référés pour une opinion chirurgicale (Rossignol, 1996; Rozmaryn, Dovellet *et al.*, 1998).

Tableau I. Profil des traitements conservateurs entrepris par les médecins omnipraticiens auprès d'individus atteints du syndrome du tunnel carpien en attente d'une première chirurgie de décompression dans certaines communautés occidentales

	Montréal, Canada N = 238	Baltimore, États-Unis N = 263	Derby, Royaume-Uni N = 227
Médication orale (AINS)	28%	18,8%	8,9%
Orthèse au poignet	27%	73%	22,8%
Infiltration de cortisone	27%	22,6%	9,8%
Physiothérapie	7%	5,3%	2,9%
Modifications ergonomiques	N.D.	1,8%	0,4%

N.D. = non-disponible

*Données de Rossignol (1996) ; Burke, et al. (2007)

Dans un contexte de services de santé publique axés sur l'efficacité, la gestion des coûts et l'amélioration de l'accès aux soins, il apparaît capital de bonifier l'offre de traitement conservateur aux individus atteints du STC, particulièrement dans l'attente d'une chirurgie de décompression. À cet effet, les physiothérapeutes proposent souvent les exercices neurodynamiques pour réduire les symptômes et améliorer les capacités fonctionnelles de ces individus. Un programme de réadaptation fondé sur ces exercices ne requiert aucun équipement spécialisé et peut être complété à domicile sous la supervision indirecte d'un thérapeute. Ainsi, ce projet d'études doctorales s'intéresse à développer et évaluer la pertinence d'un tel programme afin d'améliorer l'offre thérapeutique disponible pour les individus atteints du STC.

2. RECENSION DE LA LITTÉRATURE

La recension de la littérature présentée dans cette thèse s'articule autour de quatre grandes thématiques : l'anatomie et la physiologie du nerf médian; le syndrome du tunnel carpien; l'inventaire des interventions disponibles dans le traitement du syndrome du tunnel carpien ; et les exercices neurodynamiques. La section sur l'anatomie et la physiologie du nerf médian présente des notions fondamentales pertinentes à la problématique abordée. La section sur le syndrome du tunnel carpien décrit la présentation clinique des individus atteints de cette condition, les facteurs de risques, la pathophysiologie et le diagnostic. La section sur les interventions thérapeutique présente une synthèse des évidences actuelles. La section sur les exercices neurodynamiques présente une revue des concepts théoriques, des différentes techniques, des exercices neurodynamiques et de leurs effets attendus, le tout appliqué dans le contexte d'une problématique du nerf médian.

2.1. Anatomie et physiologie du nerf médian : implication pour le syndrome du tunnel carpien

Le nerf médian est l'un des trois principaux nerfs mixtes du membre supérieur. Il assure la transmission d'influx nerveux sensitifs, moteurs et autonomes provenant de la moelle épinière qui sont nécessaires à la fonction optimale de la main. Tout comme les autres nerfs périphériques, le nerf médian assure le relais entre le système nerveux central et la périphérie. Toutefois, il existe une relation spécifique entre le tunnel carpien, le contenu du tunnel carpien et le nerf médian. Cette relation sera exposée par une synthèse des caractéristiques anatomiques, physiologiques, et biomécanique du nerf médian.

2.1.1. Anatomie générale du tunnel carpien

Le tunnel carpien est une région anatomique du poignet décrite en deux volets en fonction du contenant et du contenu. Un rappel anatomique est présenté, tiré d'ouvrages de référence en anatomie (Gray & Clemente, 1985; Netter, 2014). Le contenant est composé des

os du carpe et du ligament annulaire du carpe, aussi nommé rétinaculum des fléchisseurs. Les éléments osseux du tunnel carpien forment deux rangées où l'on distingue une section proximale et distale. Les os scaphoïde, lunatum et triquetrum forme la première rangée du carpe et sont reliés par des articulations planes de type arthroïde, munies d'un appareil ligamentaire dorsal, palmaire et interosseux. Les os hamatum, capitatum, trapèzoïde et trapèze forment la rangée distale et sont également reliées par des articulations planes. Les deux rangées d'os carpiens, combinées au support du ligament annulaire, forment un tunnel fibro-osseux rigide. Cette rigidité, combinée à la mobilité du poignet dans le plan sagittal, permet au tunnel carpien d'assurer un rôle de poulie avec son contenu. Le contenu du tunnel carpien est composé de plusieurs structures dont le nerf médian, deux bourses synoviales (radiale et ulnaire), ainsi que neuf tendons (c.-à-d., quatre tendons fléchisseurs superficiels ; quatre tendons fléchisseurs profonds ; le tendon fléchisseur du pouce) (voir figure 1). Aussi, en dorsal on retrouve une structure de support entre les tendons fléchisseurs et la portion interne de la bourse ulnaire nommé le tissu conjonctif subsynovial « *subsynovial connective tissue* ». (Ettema, Amadio *et al.*, 2004). Ce tissu conjonctif subsynovial est composé de multiples couches de fibres de collagène qui assurent une réduction des forces de frictions lors de l'excursion des tendons (Ettema *et al.*, 2004).

Le tunnel carpien, par sa forme étroite et la mobilité importante de son contenu, représente une région où s'exerce d'importantes forces mécaniques.

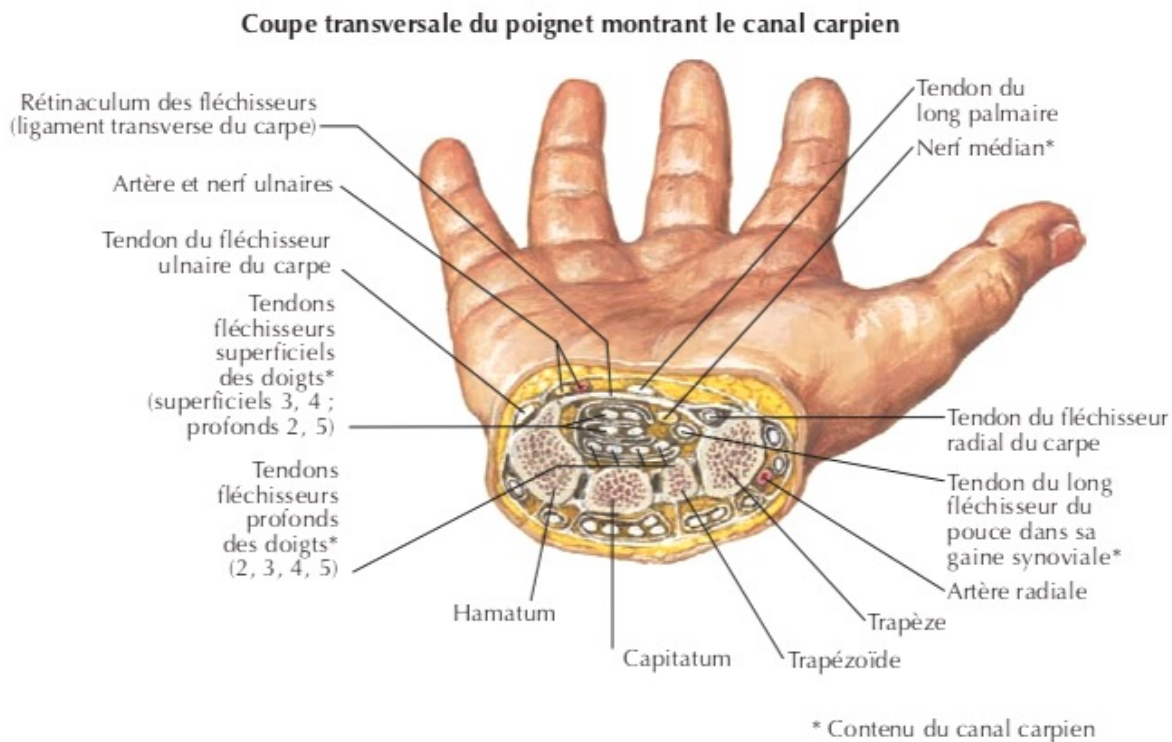


Figure 1. Illustration du contenu du tunnel carpien d'après Netter (2014, p. 434)

2.1.2. Anatomie générale du nerf médian

Le nerf médian origine de la jonction des faisceaux médial et latéral du plexus brachial au niveau de l'aisselle qui sont eux constitués de fibres nerveuses en provenance des segments médullaires de C5 à T1. Le nerf médian parcourt le bras en médial de l'artère brachial et passe sous l'aponévrose bicipitale au niveau du coude. En distal du coude, le nerf médian pénètre entre les chefs du muscle rond pronateur et donne une branche motrice qui devient le nerf interosseux antérieur. Le nerf médian chemine dans l'avant-bras entre le muscle fléchisseur superficiel et profond des doigts pour atteindre le tunnel carpien au poignet. Il pénètre dans la main sous le ligament transverse du carpe et donne naissance à la branche thénarienne motrice. Plus loin, le contingent sensitif des fibres du nerf médian atteint l'extrémité des trois premiers doigts ainsi que le côté radial du quatrième. Certaines fibres nerveuses du nerf médian parcourent toute la longueur du bras et peuvent atteindre plus d'un mètre de long.

Pour assurer un support aux fibres nerveuses, le nerf médian est pourvu de trois couches de tissus conjonctifs : l'endonerve, le périnerve et l'épinerve. D'abord, l'endonerve est en étroite

relation avec les fibres nerveuses. Il est constitué d'une matrice compacte de fibres de collagène de type I et II et contient les cellules de Schwann, des fibroblastes, des macrophages et des mastocytes. Les fibres nerveuses sont regroupées à l'intérieur d'ensembles de faisceaux nommés fascicules délimités par le périnerve. Le périnerve est formé de multiples couches (jusqu'à quinze) de cellules plates intercalées de fibres élastiques et de collagène de type I et II circonférentielle orientées obliquement et longitudinalement (Topp & Boyd, 2006). La haute densité et l'organisation des cellules périneurales forment la résistance primaire aux forces d'élongation (Kwan, Wall *et al.*, 1992; B. L. Rydevik, Kwan *et al.*, 1990; Sunderland, 1951; Topp & Boyd, 2006). Enfin, l'épinerve forme la couche la plus externe et contient une matrice nommée l'espace épineural. Cette matrice est composée de fibres de collagène de type I et III orientées longitudinalement, de fibres élastiques, de fibroblastes, de mastocytes et de cellules adipeuses. La proportion qu'occupent les fascicules nerveux varie entre 30 et 80% de l'aire transverse du nerf selon l'emplacement anatomique. Par exemple, les régions susceptibles aux forces compressives contiennent un plus grand nombre de fascicules de plus petite taille. Cette disposition permet de disperser la pression dans l'espace épineural et serait présente dans le tunnel carpien (Piña Oviedo & Ortiz Hidalgo, 2008). À l'inverse, les régions susceptibles aux forces d'élongation contiennent moins de fascicules mais ces derniers sont dotés de couches de cellules périneurales supplémentaires.

L'organisation des fascicules nerveux favorise la dispersion des forces de compression dans le tunnel carpien, mais pas des forces d'élongation.

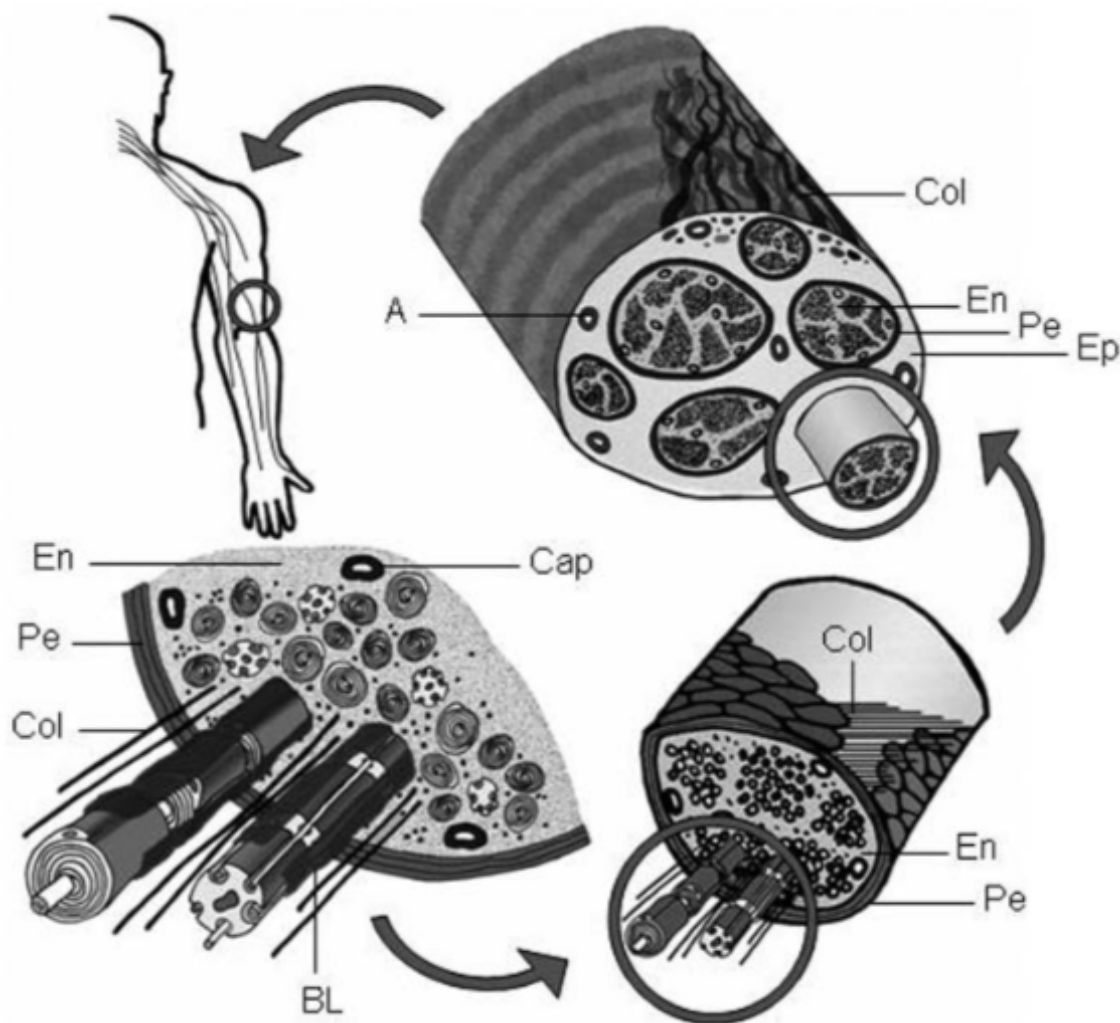


Figure 2. Illustrations anatomiques des couches de tissus conjonctifs du nerf médian d'après Topp & Boyd (2006) A = artère, BL = *basal lamina*, Cap = capillaires, Col = collagène, En = endonèvre, Ep = épinerve, Pe = périnerve

Le système nerveux périphérique a besoin d'un apport constant en oxygène et énergie assuré par la microcirculation. Il est donc sensible à la baisse d'apport en oxygène soit par hypoxémie ou diminution du flot sanguin (B. L. Rydevik *et al.*, 1990). Les nerfs périphériques, tels que le nerf médian, possèdent un système vasculaire spécifique de composé d'artérioles ondulées en « tire-bouchon » permettant de maintenir un flot sanguin continu aux fibres nerveuses tout en s'adaptant aux divers mouvements imposés par nos activités quotidiennes (Butler, 1991, p. 22). Dans la région du tunnel carpien, les vaisseaux nourriciers proviennent

des artères ulnaires et radiales et cheminent longitudinalement dans l'espace épineural de la portion ventrale du nerf. Les vaisseaux de l'épinèvre atteignent la surface du périnèvre où ils forment un plexus vasculaire distribué longitudinalement. Des artérioles perforantes pénètrent obliquement les couches de cellules périneurales vers le milieu endoneural. L'organisation stratifiée du périnerve agit comme une valve et régularise le flot sanguin (voir figure 3). L'espace endoneural maintient une pression légèrement positive et est démunie de circulation lymphatique. Cette organisation permet d'assurer une perfusion constante des fibres nerveuses et de résister à un certain niveau de stress mécanique ou même d'une lésion des tissus épineuraux. Toutefois, cette organisation ne favorise pas le drainage d'un œdème endoneural (B. L. Rydevik *et al.*, 1990).

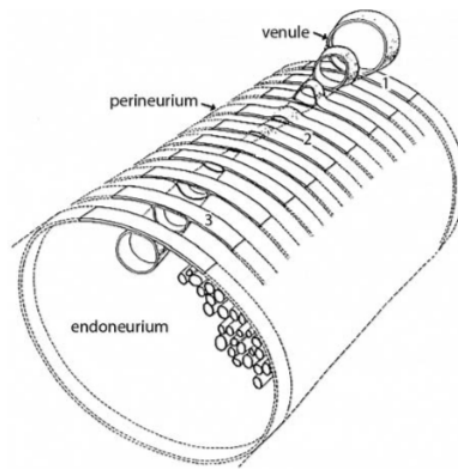


Figure 3. Sections transverses d'un fascicule nerveux du nerf sciatique chez le rat démontrant une veinule traversant le périnerve, tiré de Riccardo Luchetti and Amadio (2002, p. 31)

2.2. Revue des propriétés biomécaniques des nerfs périphériques

Au fil de nos activités de la vie quotidienne, nos nerfs périphériques doivent s'adapter aux contraintes de tension, de cisaillement et de compression répétée sans perdre leur capacité à transmettre des influx nerveux. Par exemple, le nerf médian peut s'allonger et se raccourcir lors des mouvements de flexion et d'extension du poignet afin d'accommoder toute l'amplitude

de mouvement (Brochwicz, von Piekartz, & Zalpour, 2013; Gonzalez-Suarez, Buenavente *et al.*, 2018). Dans ce cas, les forces mécaniques appliquées au nerf médian sont dissipées par une combinaison de déformation et d'excursion (Topp & Boyd, 2006). La déformation peut être objectivée directement à l'aide de jauge de déformation ou indirectement en mesurant un ratio d'excursion (Andrew Dilley, Lynn *et al.*, 2003; Wright, Glowczewskie *et al.*, 1996). Ensuite, l'excursion fait référence au glissement qui survient entre le nerf et les structures anatomiques avoisinantes. Elle peut être longitudinale ou transverse et se mesure généralement en millimètre (Topp & Boyd, 2006).

2.2.1. La capacité de déformation du nerf médian

La relation entre la tension intraneurale et l'élongation d'un segment de nerf périphérique est représentée par une courbe sigmoïdale (voir figure 4) (Topp & Boyd, 2006). Lorsqu'une force est appliquée à partir de l'état de repos d'un nerf, on observe initialement une élongation du tissu nerveux accompagnée d'une faible d'augmentation de la tension intraneurale (phase 'toe-region'). Ce phénomène est attribué au déploiement des tissus conjonctifs, notamment des fibres élastiques, contenus dans l'espace endoneural et dans l'épinerve (Kwan *et al.*, 1992; Topp & Boyd, 2006). Si l'application de la force est maintenue, l'élongation des fibres sera accompagnée d'une augmentation proportionnelle de tension intraneurale. La pente de cette relation directe définit le module d'élasticité du tissu nerveux, où une pente forte implique que le nerf est moins élastique ou plus rigide (Topp & Boyd, 2006). Enfin, en maintenant la force, la tension intraneurale augmentera jusqu'au point déformation plastique de la structure du nerf qui survient autour de 40% d'élongation (Kwan *et al.*, 1992; B. L. Rydevik *et al.*, 1990).

Cette relation tension / élongation du nerf périphérique se manifeste de différentes façons lorsque l'on quantifie les propriétés biomécaniques des nerfs périphériques *in vivo*. Par exemple, le nerf prend un aspect 'ondulé' lorsque son trajet est raccourci (c.-à-d. flexion du coude ou du genou) (Andrew Dilley *et al.*, 2003; Richard Ellis, 2011). Cette caractéristique comble, en quelque sorte, un rôle de réserve physiologique de mouvement en vue d'accommoder les mouvements des grandes articulations (c.-à-d. épaule, coude, poignet) (Andrew Dilley *et al.*, 2003). Aussi, le groupe de Dilley et al. a observé que l'élongation du nerf médian augmente proportionnellement à l'amplitude de mouvement au poignet si le membre supérieur est

préalablement positionné de sorte que le trajet du nerf médian était légèrement sous tension (Andrew Dilley *et al.*, 2003).

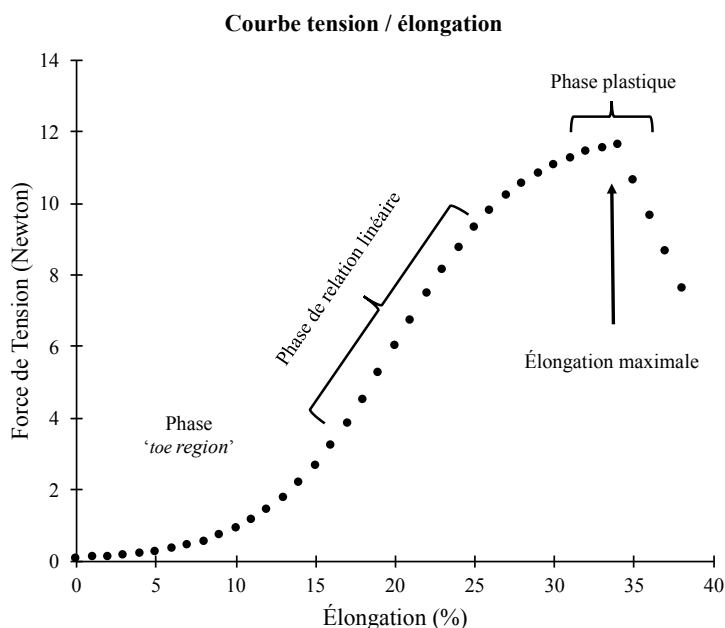


Figure 4. Courbe de tension / élongation d'un nerf périphérique tirée de topp & boyd (2006)

2.2.2. La capacité d'excursion du nerf médian

Une des premières observations de l'excursion longitudinale du nerf médian a été rapportée par McLellan et Swash (1976). Ils ont introduit l'idée que l'excursion du nerf est nécessaire afin de disperser adéquatement les contraintes mécaniques et qu'une restriction d'excursion mène à l'augmentation de tension intraneural. Cette idée fut appuyée plus tard par Wilgis et Murphy (1986) qui ont présenté l'excursion comme un élément essentiel à conserver ou améliorer afin d'assurer le succès d'interventions chirurgicales. L'étendue des connaissances relatives à la capacité d'excursion de nerfs périphériques s'est accrue au fil des observations issues d'études sur cadavres et plus récemment chez l'humain grâce à l'imagerie par ultrasonographie. (Brochwicz, von Piekartz, & Zalpour, 2013; A. Dilley, Greening *et al.*, 2001; Gonzalez-Suarez *et al.*, 2018). Différentes combinaisons de positions ou mouvements du tronc, du rachis cervical et du membre supérieur influencent l'amplitude d'excursion (Silva, Manso *et al.*, 2014). Ce constat se révèle par l'importante variation des mesures d'excursion rapportées

dans la littérature tel que présenté dans le tableau II. L'excursion transverse du nerf médian rapportée dans la littérature varie entre 1,5 à 3,0 mm chez l'humain et entre 0,9 à 1,9 mm sur cadavre (Nakamichi & Tachibana, 1995; Yoshii, Villarraga *et al.*, 2009). L'excursion longitudinale du nerf médian rapportée dans la littérature varient entre 0,1 à 15,3 mm chez l'humain et entre 0 à 23,8 mm sur cadavre (M. Coppieters & Butler, 2008; Andrew Dilley *et al.*, 2003; Gonzalez-Suarez *et al.*, 2018; Hough, Moore, & Jones, 2007; Nakamichi & Tachibana, 1995). Une réflexion issue de la littérature actuelle et de l'expérience personnelle en laboratoire est proposée afin de simplifier les facteurs influençant l'excursion.

2.2.2.1. L'amplitude et la direction de l'excursion

Lors d'un mouvement articulaire (p.ex., l'extension du poignet), une force de tension se concentre près de l'articulation mobilisée. Par conséquent, l'amplitude de mouvement d'excursion est plus importante près de l'articulation mobilisée pour dissiper ces forces (M. Coppieters & Butler, 2008; Silva *et al.*, 2014). À mesure qu'un mouvement articulaire se poursuit, le glissement du nerf se produira à des endroits plus éloignés le long du même nerf. L'excursion est alors progressivement inférieure à celle qui se produit au site du mouvement articulaire initial (R. J. Nee, Yang *et al.*, 2010). Par exemple, Dilley, et al. (2003) ont rapporté que l'excursion longitudinale du nerf médian est significativement plus élevée à l'avant-bras (4,2 mm) par rapport au bras (1,8 mm) pour un même mouvement d'extension du poignet. Ainsi, l'excursion du nerf médian n'est pas constante à travers tout son parcours anatomique, notamment dans les régions articulaires où la compliance du nerf est réduite par l'organisation des tissus conjonctifs et l'apport de vaisseaux sanguins nourriciers (Topp & Boyd, 2006). Ces régions de compliance réduite influencent également la direction de l'excursion qui est définie par rapport au centre du corps. La direction de l'excursion du nerf suivra généralement la direction de l'articulation mobilisée selon un concept de convergence proposé par Shacklock (2005a). Par exemple, lorsque le poignet est amené en extension, le trajet du nerf médian s'allonge et le nerf glissera en distal par rapport au centre du corps. À l'inverse, lorsque le poignet est fléchi, ce qui raccourcit le trajet du nerf, le glissement sera proximal (Andrew Dilley *et al.*, 2003; Wright *et al.*, 1996). Toutefois, une direction d'excursion opposée est observée lorsque les mesures sont prises de part et d'autre du coude en raison de la compliance réduite du nerf médian à cette région. Ainsi, l'extension du coude induit une excursion distale du nerf

médian dans le bras alors que l'excursion est proximale dans l'avant-bras (Andrew Dilley *et al.*, 2003; Wright *et al.*, 1996). Notons que lorsque le nerf médian est évalué *ex vivo*, sa compliance est plus élevée, probablement en raison du bris des tissus conjonctifs dans ces régions articulaires. Ceci explique, en partie, les mesures d'amplitudes d'excursion plus élevées rapportées par les études faites sur modèles cadavériques (Butler, 1991, pp. 46-53; M. Coppieters, Alshami, & Hodges, 2006).

La compliance du nerf médian est diminuée au coude, ce qui influence l'amplitude et la direction de l'excursion du nerf.

2.2.2.2. L'excursion est en étroite relation avec la capacité de déformation

L'excursion du nerf suit approximativement la même relation sigmoïdale que celle retrouvée sur la courbe de tension / déformation présentée à la figure 4 (Topp & Boyd, 2006). Les tracés des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian obtenus lors des travaux de cette thèse présentent en grande majorité cette relation caractérisée par une pente directe suivie d'un amortissement. Un exemple de tracé d'excursion, accompagné d'explications supplémentaires, est présenté dans la section méthode de cette thèse (voir figure 16). Cette relation sigmoïdale influence potentiellement l'amplitude d'excursion rapportée dans la littérature. Par exemple, si on évalue l'excursion du nerf médian alors que le poignet est positionné en flexion, une position qui réduit la tension sur le nerf médian, l'extension des doigts ne provoque pas d'excursion significative (Andrew Dilley *et al.*, 2003). Ce phénomène s'explique par le déploiement des tissus conjonctifs du nerf qui initialement n'entraîne aucune ou très peu d'excursion (Topp & Boyd, 2006). D'autre part, si on évalue l'excursion d'un nerf alors qu'il est déjà dans une position de tension, où qu'il présente des propriétés biomécaniques déficientes, l'amortissement de la courbe d'excursion surviendrait précocement et l'amplitude d'excursion sera moindre.

Tableau II. Amplitudes d'excursion longitudinale du nerf médian mesurées à l'aide de l'imagerie par ultrasonographie recensées dans la littérature

Auteur	Nombre de participants	Position du membre supérieur	Articulation mobilisée	Site de mesure	Excursion du nerf (mm)
Broschwicz <i>et al.</i> (2013)	N = 9	Épaule à 30° d'abduction et rotation externe, coude en extension et avant-bras en supination	Inclinaison cervicale controlatérale passive maximale jusqu'au seuil de l'inconfort	Avant-bras	1,9 (IC _{95%} : 1,5 – 2,3)
Dilley <i>et al.</i> (2003)	N = 10	Épaule à 45° d'abduction, coude en extension	Extension poignet (40°)	Avant-bras	4,7 (IC _{95%} : 4,4 – 5,0)
		Épaule à 45° d'abduction, coude en extension	Extension poignet (40°)	Distal du bras	2,4 (IC _{95%} : 1,9 – 2,9)
Coppieters <i>et al.</i> (2009)	N = 15	Épaule à 90° d'abduction avant-bras en supination	Extension simultanée du coude (~ 83°) avec inclinaison cervicale ipsilatérale (~ 29°)	Tiers moyen du bras	10,2 (IC _{95%} : 8,4 – 12,0)
			Extension simultanée du coude (~ 141°) avec inclinaison cervicale controlatérale (~ 29°)	Avant-bras	1,8 (IC _{95%} : 0,0 – 3,6)

2.3. Le syndrome du tunnel carpien

2.3.1. Perspective historique

Les premières descriptions du STC remontent à 1854 alors que Sir James Paget notait que les individus immobilisés dans la position de Cotton-Loder (poignet plâtré en position de flexion maximale pour réduire une fracture du radius distal) développaient des douleurs et paresthésies localisées sur le territoire de la main innervé par le nerf médian (Abbott & Saunders, 1933). En 1957, George Phalen émettait l'hypothèse qu'une pression plus élevée dans le tunnel carpien était observée chez certains individus et contribuait à altérer l'intégrité du nerf médian (Phalen & Kendrick, 1957). D'ailleurs, ses travaux ont mené à la proposition d'une technique chirurgicale de décompression du tunnel carpien. Aujourd'hui, l'Académie américaine d'orthopédie (2016) définit le STC comme une neuropathie canalaire (traduction de *entrapment neuropathy*) du nerf médian. Les neuropathies canalaire décrivent un processus pathologique qui survient lorsqu'un nerf périphérique est soumis à des forces de compression chronique dans une région anatomique non flexible (p.ex., le tunnel carpien) (Ibrahim *et al.*, 2012).

2.3.2. Présentation clinique

La principale plainte associée au STC est la douleur dysesthésique (c.-à-d., une sensation inhabituelle ou anormale telle que la sensation de brûlure, de picotement, ou de chocs électricité) au poignet et à la main (Ibrahim *et al.*, 2012; R. Nee & Butler, 2006). Les symptômes sont principalement rapportés au pouce, à l'index, au majeur, ainsi que sur le versant radial de l'annulaire, bien que la plupart des individus atteints ont de la difficulté à identifier précisément quels doigts sont symptomatiques. En effet, près de deux individus sur trois atteints du STC rapportent des symptômes au-delà du territoire du nerf médian, c.-à-d. au cinquième doigt, au dos de la main, à l'avant-bras, ou encore à l'épaule (Caliandro, La Torre *et al.*, 2006). Les individus atteints du STC rapportent généralement des symptômes à prédominance nocturne qui sont temporairement atténués en secouant vivement le poignet (Signe de flick).

Le STC est associé à des limitations fonctionnelles (p.ex., difficultés à exécuter des tâches répétitives avec la main) ainsi que des restrictions de la participation au travail. Des données issues d'une large étude multicentrique témoignent que les individus qui présentent une

atteinte légère à modérée sont plus susceptibles de présenter des symptômes substantiels et des incapacités légères, tandis que les individus qui présentent une atteinte plus grave peuvent présenter des symptômes moins sévères, mais des incapacités plus sévères (Padua, Padua *et al.*, 2002). À l'origine de ce paradoxe, il est avancé qu'une atteinte sensorimotrice sévère altère la fonction des fibres nerveuses nociceptives au point de réduire l'expérience de dysesthésie et de douleur (Ibrahim *et al.*, 2012).

2.3.3. Facteurs de risque

Le STC est souvent décrit comme un décalage entre le volume du contenu et du contenant. En d'autres termes, le tunnel carpien ayant un potentiel d'expansion limité, toutes conditions qui provoquent une augmentation de volume du contenu ou une diminution de volume du contenant favoriseront une augmentation de pression à l'intérieur du tunnel carpien. Bien que différentes explications aient été avancées pour expliquer ce décalage, la cause exacte demeure bien souvent inconnue et donc dite : idiopathique (Riccardo Luchetti & Amadio, 2002, p. 21). Toutefois, certaines conditions associées sont reconnues comme facteurs de risques et peuvent aider à confirmer le diagnostic clinique (voir résumé tableau III). Les facteurs de risque peuvent être divisés en trois catégories: (1) les facteurs extrinsèques au nerf médian qui augmentent le volume dans le tunnel (p. ex., ténosynovite des tendons); (2) les facteurs intrinsèques au nerf médian qui augmentent le volume dans le tunnel (p. ex., des tumeurs); (3) les facteurs qui diminuent le volume du tunnel (p. ex., fracture du radius) (MacDermid & Wessel, 2004; Rossignol, 1996). Aussi, certaines conditions médicales (comorbidités) sont associées au STC en raison d'interférence avec la vascularisation ou la régulation des fluides. La rétention d'eau au troisième trimestre de grossesse est l'une des hypothèses principales expliquant la prédominance du STC chez la femme enceinte.

Des facteurs occupationnels sont également mis en cause avec le développement d'un STC. Des études ont rapporté une incidence du STC plus élevée chez les travailleurs de ligne de montage impliquant des gestes répétitifs (Bongers, Schellevis *et al.*, 2007; Fan, Harris-Adamson *et al.*, 2015). Or, cette association entre le travail et le STC demeure controversée. L'apparition insidieuse des symptômes et l'absence de critère étalon « *gold standard* » diagnostique explique en partie cette situation alors que le lien entre le travail et l'origine du STC est bien souvent laissé à la subjectivité de l'expertise médicale (Tcaciuc, Lortie, & Patry, 2011).

Néanmoins, une liste des facteurs non professionnels et professionnels a été élaborée dans le rapport de Dr Rossignol commandé par la CSST (aujourd'hui CNESST) et est présentée dans cette thèse afin d'illustrer certains facteurs professionnels à considérer.

Tableau III. Facteurs de risques du STC

Facteurs extrinsèques et intrinsèques	Facteurs occupationnels
<ul style="list-style-type: none"> • Tumeur; infection; hématome • Synovites des tendons fléchisseurs des doigts (souvent associé aux maladies rhumatismales); muscles lombricaux accessoires; tumeur synovial • Séquelle de fracture réduisant le volume du tunnel carpien <p>Comorbidité</p> <ul style="list-style-type: none"> • Maladies rhumatismales inflammatoires • Diabète • Problème thyroïdien • Maladie hépatique • Maladie rénale • Obésité • Grossesse 	<p>Facteurs non professionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> • Certains loisirs / sports (p.ex., jeux vidéos, cyclisme) <p>Facteurs professionnels</p> <ul style="list-style-type: none"> • Répétition des gestes • Force • Déviation du poignet • Pressions mécanique (impacts répétés sur le talon de la main ou pression locale par contact avec l'équipement des postes de travail) <p>Cofacteurs physiques</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vibrations segmentaires • Port des gants serrés • Travail au froid • Temps de repos insuffisant

2.3.4. Pathophysiologie du STC

Un regroupement d'experts reconnaît que le STC est une condition complexe dont la pathophysiologie n'est pas uniquement mécanique (A. Schmid, Nee, & Coppieters, 2013). Si l'apparition des symptômes semble expliquée par des altérations de l'intégrité biologique du nerf médian dans le tunnel carpien (mécanismes périphériques), la nature chronique ainsi que

l'étendue des déficiences périphériques au-delà du territoire du nerf médian seraient attribuées à des altérations des centres spinaux et supra-spinaux sensori-moteurs (mécanismes centraux) (Fernandez-de-las-Penas, de la Llave-Rincon *et al.*, 2009; A. Schmid, Nee, & Coppieters, 2013).

2.3.4.1. Mécanismes périphériques impliqués dans le STC

Les mécanismes périphériques impliquent une combinaison de compression, d'inflammation du tissu nerveux et d'altération biomécanique du nerf médian (voir figure 6). L'élément principal impliqué dans la pathophysiologie du STC est l'augmentation de pression dans le tunnel carpien induisant une compression sur le nerf médian (Ibrahim *et al.*, 2012; R. Luchetti, Schoenhuber, & Nathan, 1998; Szabo & Chidgey, 1989). Des études sur modèle animal ont illustré que l'exposition chronique d'un nerf à une compression d'environ 30 mm Hg serait suffisante pour entraîner une cascade de réactions délétères au site de compression (Dahlin, Rydevik *et al.*, 1984; Powell & Myers, 1986; B. Rydevik, McLean *et al.*, 1980). Or, la pression mesurée à l'intérieur du canal carpien chez les individus atteints du STC est non seulement plus élevée en moyenne ($\bar{x} = 23,7$; E.T. = 11,9, mm Hg) par rapport à celle mesurée chez des individus asymptomatiques ($\bar{x} = 7,9$; E.T. = 6,5, mm Hg), mais serait aussi supérieure à 30 mm Hg au repos chez certains individus (Riccardo Luchetti & Amadio, 2002, p. 50; Werner & Andary, 2002). Il faut ajouter que les mouvements de flexion et d'extension du poignet augmentent la pression à l'intérieur du tunnel carpien qui peut alors atteindre jusqu'à 80 mm Hg (R. Luchetti, Schoenhuber, & Nathan, 1998). On peut donc expliquer l'association entre l'exposition à des mouvements répétés du poignet et le STC rapportée dans la section précédente. L'exposition à une compression chronique a comme effet d'augmenter la résistance à l'écoulement naturel du flot sanguin et donc, de favoriser un engorgement veineux ainsi que la formation d'un oedème. Une fois l'œdème endoneural installé, il est très difficile à drainer en raison de l'absence d'un système lymphatique et de la barrière formée par le périnerve qui limitent l'évacuation d'un exsudat (Lundborg & Dahlin, 1996). La compression induit également une ischémie focale qui peut faire réagir les cellules de Schwann et précipiter une démyélinisation (Powell & Myers, 1986).

D'autre part, l'exposition à des forces mécaniques répétées (p. ex., traction, cisaillement, de friction, ou compression) peut endommager les fibres du nerf médian et précipiter une

réaction inflammatoire (B. L. Rydevik *et al.*, 1990). Des débris tissulaires, ainsi que l'ischémie stimule l'activation des cellules immunitaires résidentes dans l'espace endoneural (p. ex. : macrophage, mastocyte) qui peuvent entretenir un environnement inflammatoire en relâchant des cytokines (A. Schmid, Nee, & Coppieters, 2013). Une inflammation persistante mène à des changements histologiques, par exemple une prolifération de fibroblastes, et en retour se manifester par une altération de l'intégrité biologique et physiologique du nerf médian (Lundborg, 1988). L'inflammation contribue ainsi à l'installation d'un cercle vicieux qui potentialise les effets adverses de la compression et de l'altération des propriétés biomécaniques dans le STC.

Les capacités du nerf médian à bouger (excursion) et se déformer sont essentielles au maintien de la fonction des fibres nerveuses. L'altération des propriétés biomécaniques du nerf médian contribuerait théoriquement à rendre le nerf médian plus susceptible aux contraintes mécaniques imposées au quotidien. Par exemple, la formation de fibrose pourrait contribuer à réduire l'élasticité du tissu conjonctif subsynovial et altérer la capacité du nerf à glisser entre les structures environnantes (Festen-Schrier & Amadio, 2018). Si la capacité d'excursion du nerf est déficiente, il y aura davantage d'élongation associée à une augmentation proportionnelle de la pression intraneurale. Chez l'humain, des valeurs d'élongation de l'ordre de 6,8% à 9,5% sont potentiellement suffisantes pour altérer la fonction du nerf. Ces valeurs d'élongation ont été rapportées sur cadavre que lorsque le membre supérieur était positionné avec l'épaule à 90° d'abduction et en rotation externe, le coude et le poignet en extension complète (M. Coppieters & Butler, 2008; Kleinrensink, Stoeckart *et al.*, 2000; Wright *et al.*, 1996). Il y est donc plausible que des mouvements du membre supérieur de moindres amplitudes soient suffisant pour excéder les limites de l'intégrité physiologique du nerf médian lorsque sa capacité d'excursion est déficiente. En toute logique, si l'excursion transverse est limitée, des conséquences similaires peuvent être observées sur l'excursion longitudinale. Un des éléments clés de cette thèse est la quantification de l'excursion du nerf médian dans l'optique d'évaluer si nous pouvons détecter ces déficiences chez les individus STC et si nous pouvons l'influencer.

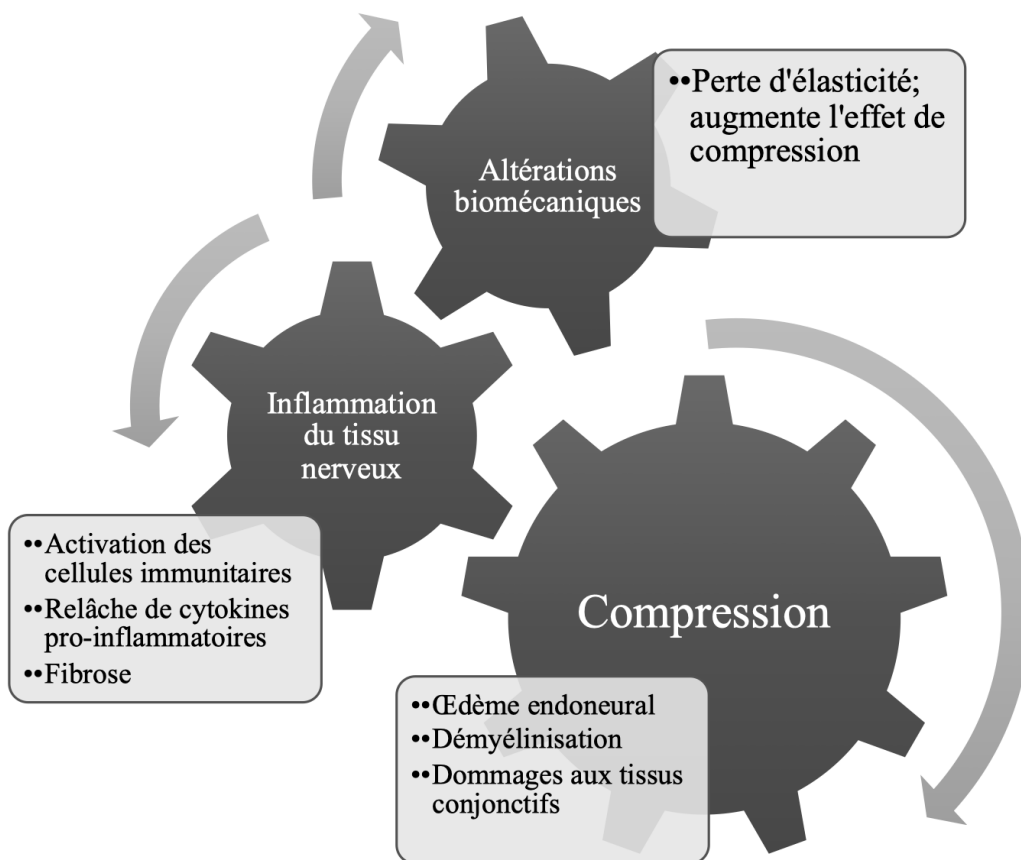


Figure 5. Les mécanismes périphériques impliqués dans le syndrome du tunnel carpien et leurs interactions

2.3.4.2. Mesures des mécanismes périphériques par imagerie quantitative par ultrasonographie

Les mécanismes périphériques exposés précédemment entraînent des changements délétères dans l'intégrité du nerf médian qui peuvent être caractérisés par l'imagerie quantitative par ultrasonographie (IQUS). Spécifiquement, l'IQUS représente un outil d'évaluation rapide, précis et non invasif, permettant d'analyser la morphologie, la composition, et l'organisation de structures musculosquelettiques, dont le nerf médian (A. Dilley *et al.*, 2001; Impink, Gagnon *et al.*, 2010; Pillen, van Alfen *et al.*, 2011). En ce qui concerne l'analyse de la morphologie du nerf médian, les valeurs normatives de l'aire transverse du nerf médian en proximal du tunnel carpien ont été établies entre 7,0 mm² et 9,6 mm² (Buchberger, Judmaier *et al.*, 1992; Duncan,

Sullivan, & Lomas, 1999; Nakamichi & Tachibana, 2002). L'un des traits distinctifs associés au STC est l'augmentation de la taille du nerf médian proximal au tunnel carpien où une mesure supérieure à 12 mm² est associée au diagnostic de STC avec une sensibilité et une spécificité de plus de 85% et 95%, respectivement (D. Lee, van Holsbeeck *et al.*, 1999; Moran, Perez *et al.*, 2009; Nakamichi & Tachibana, 2002). Le changement minimal détectable relatif de la mesure de l'aire transverse du nerf est égal ou inférieur à 5% lorsque les résultats d'au moins deux images sont colligés, témoignant de la sensibilité au changement de cette mesure (Impink *et al.*, 2010). Toutefois, les changements morphologiques ne donnent pas un portrait complet des mécanismes physiologiques en jeux. À cet effet, l'analyse des pixels générés lors de la numérisation de l'image du nerf médian offre des informations complémentaires sur la composition et l'organisation du nerf. Chaque pixel se voit attribuer une valeur sur une échelle de niveaux de gris variant entre zéro et 255, qui représentent le noir et le blanc absolu, respectivement. Cette distribution des niveaux de gris est dépendante de la réflexion des ondes ultrasonores sur les structures imagées et, par conséquent, est influencée par des processus pathophysiologiques. En terme qualitatif, un nerf médian endommagé présenterait une image plus sombre et plus homogène alors qu'un nerf médian sain présente une image brillante et hétérogène en raison de l'organisation des fascicules nerveux (voir figure 6). En terme quantitatif, des statistiques de premier et second ordres sont utilisées pour extraire les données relatives à la distribution des niveaux de gris (c.-à-d., la composition) et la relation des pixels adjacents (c.-à-d., l'organisation ou texture), respectivement. Par exemple, un décalage des pixels vers des valeurs inférieures, indiquant un aspect plus hypoéchogène, serait reflété par une baisse de l'échogénicité (moyenne des niveaux de gris). Bien que ces mesures soient en émergences, la fidélité et le changement minimal détectable relatif de la mesure d'échogénicité ont été précédemment établis (Impink *et al.*, 2010). De plus, leur validité de construit a été confirmée auprès d'une population atteinte de tendinopathie de la longue portion du biceps et du tendon supra-épineux (Collinger, Fullerton *et al.*, 2010). Ces mesures sont définies et détaillées dans la méthodologie de cette thèse (voir section 4.4.3.2).

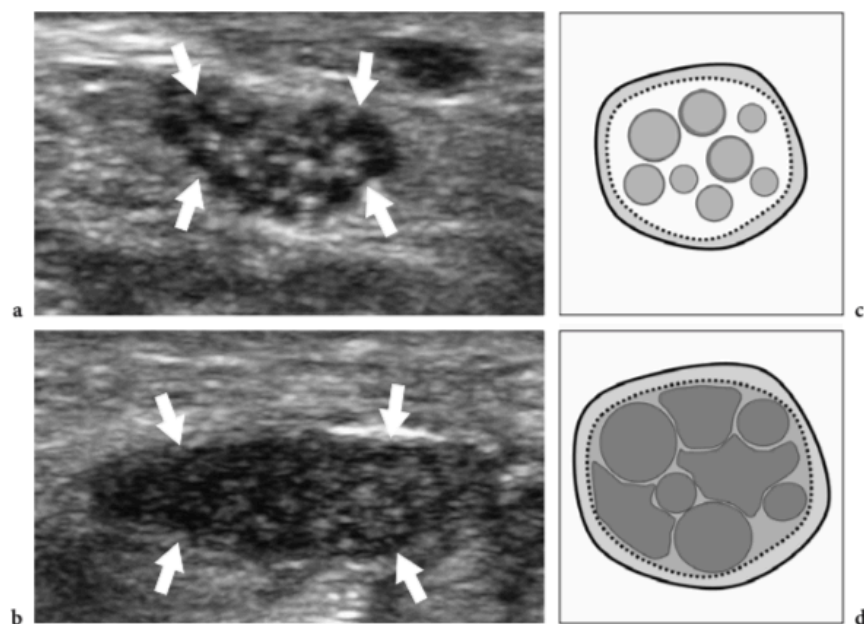


Figure 6. Images par ultrasonographie dans le plan transverse chez un individu atteint du STC obtenu **a**, en proximal du site de compression au niveau du radius et **b**, en proximal du tunnel carpien. Notez les différences perceptibles de la géométrie, de la composition et de l'organisation du nerf médian. Représentations correspondantes du nerf médian présentée en **c** et **d**. Tiré de Bianchi et Martinoli (2007, p. 106)

2.3.4.3. Mécanismes centraux impliqués dans le STC

Plusieurs études témoignent de l'implication de mécanismes centraux chez les individus atteints du STC par des symptômes extra-territoriaux, une prévalence élevée d'atteinte bilatérale et l'abaissement du seuil de sensibilité à la douleur (Fernandez-de-las-Penas *et al.*, 2009; A. Schmid, Nee, & Coppieters, 2013). En réponse aux traumatismes mécanique ou chimique locaux, tel que l'hypoxie, les corps cellulaires des fibres du nerf médian situées au niveau de la corne postérieure de la moelle épinière s'activeront en abaissant leur seuil d'excitabilité et celui des neurones environnants (Schafers, Sommer *et al.*, 2008; A. B. Schmid, Coppieters *et al.*, 2013). Ainsi, les segments médullaires C5 à T1 seraient sensibilisés et faciliteraient le relais de signaux sensitifs et/ou nociceptifs dans les dermatomes correspondants. Ceci offre un élément de réponse logique aux manifestations douloureuses débordant du territoire innervé par le nerf médian fréquemment rapportées par les individus atteints du STC. D'autre part, il fut démontré sur modèle animal qu'une lésion d'un nerf périphérique amène une réorganisation du cortex moteur à court et long terme (Schwenkreis, Scherens *et al.*, 2010). Chez les individus atteints

du STC, les premières évidences de réorganisation corticale ont été confirmées au niveau du cortex sensitif primaire à l'aide de l'imagerie fonctionnelle (Napadow, Kettner *et al.*, 2006; Tecchio, Padua *et al.*, 2002) et la magnétoencéphalographie (Tecchio *et al.*, 2002). Certains auteurs avancent que ces adaptations centrales seraient associées à une perte de l'efficacité synaptique impliquant les récepteurs GABAergiques (Rossini, Burke *et al.*, 2015). Des observations similaires ont été rapportées par le groupe de Schwenkreis *et al.* (2010) qui ont observé une baisse de l'inhibition intrahémisphérique principalement chez un groupe d'individus atteint de douleur neurogène, majoritairement atteint du STC, en comparaison à d'autres individus atteints de douleur ostéo-articulaire au pouce. En somme, chez des individus souffrant de syndrome de douleur neurogène, dont le STC, des modifications spécifiques des mécanismes régulant l'excitabilité sont observés.

2.3.4.4. Mesures des mécanismes centraux par stimulation magnétique transcrânienne

La fonction et la connectivité des aires corticales ont été étudiées par diverses méthodes chez l'humain, notamment par la stimulation électrique non-invasive (Di Lazzaro & Rothwell, 2014; Munchau, Bloem *et al.*, 2002). Parmi les techniques de stimulation électrique disponibles, la stimulation magnétique transcrânienne (SMT) permet d'évaluer l'excitabilité des circuits corticaux et présente l'avantage d'être facilement tolérée par les participants (Rossini *et al.*, 2015). La SMT implique la dépolarisation de neurones moteurs d'un hémisphère cérébral afin d'enregistrer une activité musculaire dans un muscle clé controlatéral, communément appelé potentiel moteur évoqué (PME). L'ajustement adéquat de l'intensité et de la direction de stimulations des circuits corticaux permet d'activer différentes fonctions inhibitrices et facilitatrices des cellules de la voie cortico-spinale de façon sélective (Di Lazzaro & Rothwell, 2014). Ainsi, la modulation de l'amplitude d'un potentiel moteur évoqué (MEP) généré par SMT est préférentiellement attribuable aux neurones du cortex moteur (Ridding, Brouwer *et al.*, 2000). Cette modulation dépend, entre autres, de la concentration des neurotransmetteurs glutaminergiques et de l'intégrité des voies pyramidales (Rossini, Burke, Chen *et al.* 2015). Une augmentation de l'excitabilité corticospinale est associée positivement à des mesures de douleurs, de durée des symptômes, ainsi qu'à l'amélioration de la force et de la coordination

musculaires (Parker, Lewis, Rice et al. 2016). Les mesures extraites à l'aide de la SMT sont définies et détaillées dans la méthodologie de cette thèse (voir section 4.4.3.2)

2.3.5. Diagnostic

Le soupçon d'un STC peut être évoqué par un médecin généraliste ou encore un autre professionnel de la santé (p. ex., un physiothérapeute). D'abord, l'historique antérieur peut mettre en lumière la présence d'éléments significatifs (p.ex., paresthésies nocturnes; distribution des symptômes et irradiations, positions qui provoquent ou soulage les symptômes; présence de facteurs de risque énumérés au tableau III qui caractérise le STC. Ensuite, un examen physique est réalisé comprenant la recherche d'atrophie des muscles de l'éminence thénar et le signe de Tinel et de Phalen. La sensibilité et la spécificité de ces tests sont détaillés dans la section méthode de cette thèse (voir 4.4.2). Les guides de pratiques actuels recommandent ensuite l'expertise médicale d'un médecin spécialiste ayant des compétences avec les tests de conduction nerveuse ainsi que de l'expérience clinique auprès de cette clientèle afin confirmer le diagnostic de STC et surtout exclure d'autres conditions tel qu'une radiculopathie cervicale, une plexopathie (p.ex., syndrome de Parsonnage-Turner), le syndrome du rond pronateur, un défilé thoracique ou une pathologie neurodégénérative (sclérose en plaques). Les tests de conduction nerveuse permettent de mesurer la présence de ralentissement (augmentation de latence) ou de blocage (perte d'amplitude) de la conduction au nerf médian. Ils permettent également la comparaison de la conduction des nerfs ulnaire et radial qui ne traversent pas le canal carpien. Ces tests peuvent être complétés avec l'électromyographie (EMG), qui permet d'évaluer la présence de fibrillations évoquant une atteinte axonale plus sévère. Cependant, certains auteurs remettent en cause l'utilité des tests de conduction nerveuse en raison de leur faible corrélation avec la symptomatologie (Dhong, Han *et al.*, 2000; Robinson & Kliot, 2008). Les tests de conduction dépolarisent préférentiellement les grandes fibres myélinisées qui sont responsables de la conduction sensitive et motrice et possèdent une faible capacité à évaluer les fibres de petit calibre responsables de la conduction d'influx nociceptif (A. Schmid, Nee, & Coppieters, 2013). Ces tests auraient donc une capacité limitée à classer la sévérité de l'atteinte, mais demeurent pertinents dans une perspective de diagnostic différentiel pour éliminer la présence de maladie neurodégénérative en installation.

2.4. Inventaire des interventions thérapeutiques

L'approche thérapeutique pour les individus atteints du STC est fondée sur deux options soient un traitement conservateur ou chirurgical. Du côté des traitements conservateurs, un large éventail de traitements est disponible incluant : la pharmacothérapie, les infiltrations de cortisone, les modifications ergonomiques, le port d'orthèse, des thérapies alternatives (p.ex., acuponcture, yoga) ainsi que des thérapies offertes par des professionnels de la réadaptation (O'Connor, Marshall, & Massy-Westropp, 2003). À travers cet éventail de traitement conservateur on distingue deux approches. La première approche est essentiellement médicale incluant : la pharmacothérapie, les infiltrations de cortisone et le port d'orthèse. Les évidences scientifiques appuient les infiltrations de cortisone et le port d'orthèse à court et moyen terme (c.-à-d., trois à six mois) (O'Connor, Marshall, & Massy-Westropp, 2003). Toutefois, les effets positifs de l'infiltration de cortisone ne sont pas maintenus à long terme, tandis que l'efficacité du port d'orthèse à long terme demeure inconnue (B. Huisstede, Hoogvliet *et al.*, 2010). En conséquence, cette approche est favorisée en première intention, bien qu'elle demeure insuffisante chez les individus qui éventuellement recourent à la chirurgie. La seconde approche est généralement prodiguée par des professionnels de la réadaptation et inclue des modalités (p.ex., ultrasons thérapeutiques) ou des thérapies manuelles (p.ex., mobilisations articulaires, techniques de tissu mou et les exercices neurodynamiques). L'efficacité de cette approche demeure fondée sur un faible niveau de preuve, notamment en ce qui concerne l'efficacité des exercices neurodynamiques qui sera précisée dans la section suivante (voir 2.5).

Quant à la chirurgie, elle est généralement faite sous anesthésie locale et ne nécessite pas d'hospitalisation. Le geste chirurgical consiste à sectionner le ligament annulaire du carpe afin de diminuer la pression dans le tunnel carpien et ainsi libérer la compression sur le nerf médian. Une revue systématique conclue qu'un niveau d'évidence modéré appui le traitement chirurgical à moyen et long terme en comparaison au port d'attelle au poignet et la médication anti-inflammatoire accompagnée de thérapie de la main (B. M. Huisstede, Randsdorp *et al.*, 2010). Or, il est curieux que la chirurgie de décompression du tunnel carpien, principal traitement curatif du syndrome du tunnel carpien, ne soit pas appuyée par un niveau d'évidence supérieur. Particulièrement lorsqu'on considère que, bien souvent, une seule approche de traitement conservateur est proposée aux individus atteints du STC avant d'être référés en chirurgie (voir

tableau I). D'autre part, un chirurgien expert s'est interrogé sur le taux de succès du traitement chirurgical en compilant les résultats de 209 études publiées entre 1950 et 2006 (J. D. Bland, 2007). Le succès thérapeutique a été défini par le nombre d'événements favorables incluant une bonne amélioration « *much better* » ou une résolution du problème « *cured* ». Le taux moyen de succès suite à la chirurgie a été évalué à 75%, laissant 17% d'individus sans changement significatif et 8% avec des complications ou une détérioration de leur condition. L'auteur de cette étude note que dans certains cas, une section incomplète du ligament ou un processus pathologique trop avancé expliquent en partie le taux d'échec.

En résumé, un essai de traitement conservateur est généralement recommandé avant la chirurgie, surtout lorsque les individus présentent des symptômes légers à modérés (Shi *et al.*, 2018). Inversement, la chirurgie de décompression du tunnel carpien est indiquée lorsque les symptômes sont sévères ou s'il y a échec du traitement conservateur. On souligne également que la décision de procéder à la chirurgie, est essentiellement basée sur l'expérience du chirurgien et la préférence des individus (Shi *et al.*, 2018). Ainsi, la tenue d'études supplémentaires est pertinente, notamment car de nouvelles évidences pourraient informer les cliniciens dans le choix de traitements conservateur et potentiellement repousser le recours à la chirurgie.

2.5. Les exercices neurodynamiques

2.5.1. Description et concepts théoriques

Les mobilisations neurodynamiques représentent une forme de thérapie manuelle impliquant la mobilisation du système nerveux par une combinaison de mouvements ciblés de segments corporels et visent à améliorer la capacité du tissu nerveux à tolérer les forces mécaniques imposées par nos mouvements quotidiens (Butler, 1991; Shacklock, 2005a). Cette forme d'intervention thérapeutique fut popularisée en réadaptation à la suite des travaux de physiothérapeutes experts nommément : Elvey, Maitland, Butler et Shacklock. À la base du concept des mobilisations neurodynamiques, il est proposé que plusieurs problématiques musculosquelettiques origines, ou persistent, en partie par une dysfonction du système nerveux périphérique. Par exemple, l'inflammation autour d'un nerf périphérique stimule l'apparition de sites générateurs d'impulsions ectopiques et engendre une allodynie mécanique, un concept

nommé méchanosensibilité (Bove, Ransil *et al.*, 2003). Cette méchanosensibilité est évaluée au moyen d'un examen physique. Par exemple, au membre supérieur il existe deux tests de mise en tension c.-à-d. « *Upper limb neural tension test (ULNT)1;2M* » spécifiques pour le nerf médian (Butler, 1991; Shacklock, 2005a) (voir figure 7).

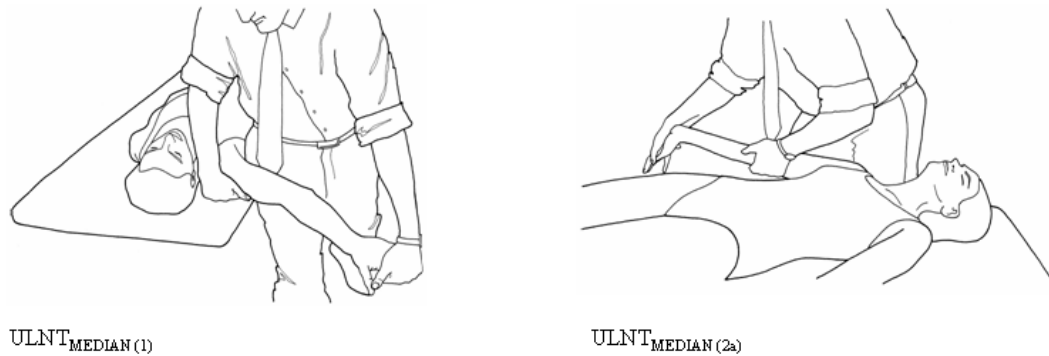


Figure 7. Manœuvres d'ULNT 1 et 2M. Tirées de (Butler, 1991), p.83

La mise en tension sélective de nerf périphérique aide le clinicien à évaluer si le nerf testé est méchanosensible et donc potentiellement impliqué dans la problématique de son client

Un deuxième concept, issu des travaux sur les propriétés biomécaniques des nerfs périphériques, est que la mise en tension de nerfs produit également des effets physiologiques (Shacklock, 2005a). D'abord, les changements mesurables de la vascularisation intraneurale lorsqu'un nerf est soumis à des forces de tension (Lundborg & Dahlin, 1996) ont aiguillé les chercheurs à évaluer l'impact des mises en tension sur la physiologie du système nerveux périphérique (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, & George, 2009; R. Nee & Butler, 2006). Des études plus récentes ont observé des effets tels que la réduction de l'œdème intraneurale (A. Schmid, Elliott *et al.*, 2012), ainsi que la réduction de l'excitabilité des neurones de la corne dorsale de la moelle épinière (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent *et al.*, 2009) immédiatement et à court terme après des séances d'exercices ciblant le déplacement du nerf médian. D'ailleurs, la nomenclature a évolué et vu l'apparition du terme « neurodynamique »

en remplacement du terme « tension » dans le but de refléter leurs effets complexes (Shacklock, 2005b).

La mise en tension de nerfs périphériques produit des adaptations mécaniques, mais aussi des adaptations physiologiques

2.5.2. Différents types de mobilisations neurodynamiques et leurs effets sur les propriétés biomécaniques de nerfs périphériques

Différentes combinaisons de mouvements articulaires sont impliquées lors des mobilisations neurodynamiques. On distingue toutefois, les combinaisons de mouvement qui induisent une excursion du nerf dans la même direction et celles qui vont dans le sens opposé. La première catégorie regroupe les techniques de glissement « *slider* » qui favorisent la capacité d'excursion du nerf tout en minimisant l'augmentation de tension intraneurale (M. Coppieters & Butler, 2008; M. Coppieters, Hough, & Dilley, 2009). Par exemple, l'extension du coude, lorsque joint à l'inclinaison ipsilatérale du cou, est considérée comme une technique de glissement (voir figure 8a). À l'inverse, la seconde catégorie regroupe les techniques de tension « *tensionner* » qui implique le mouvement seul ou combiné de segments corporels suffisant pour induire une déformation du nerf (M. W. Coppieters & Alshami, 2007; Andrew Dilley *et al.*, 2003). Les techniques de tension visent à restaurer la capacité du nerf à tolérer les forces de tension. Par exemple, l'extension du coude combinée à l'inclinaison contralatérale du cou induira une excursion du nerf de directions opposées et donc une déformation du nerf (voir figure 8b).

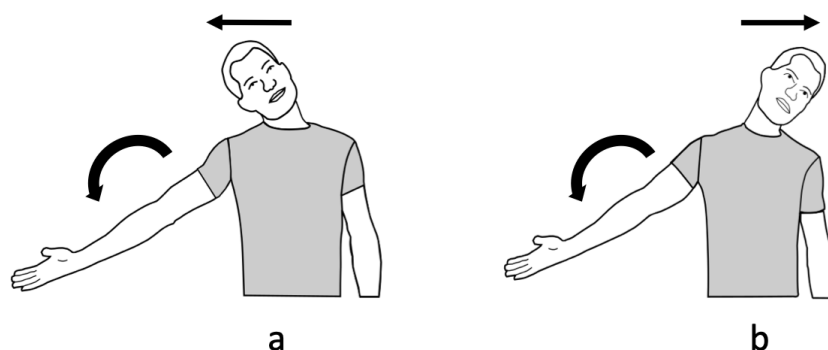


Figure 8. Exemple de technique de glissement (a) et de tension (b)

Les mobilisations neurodynamiques sont généralement regroupés en deux catégories, les techniques de glissement et de tension

Sachant que les techniques neurodynamiques impliquent différentes combinaisons de mouvements articulaires, il importe de standardiser les méthodes d'évaluation et de traitement. En effet, lors d'un exercice neurodynamique, différentes sections du nerf médian peuvent être soumises à différents degrés d'excursion et de déformation (Kleinrensink *et al.*, 2000; R. J. Nee *et al.*, 2010; Wright *et al.*, 1996). Les premières études qui ont rapporté les effets biomécaniques ont mesuré l'amplitude de mouvement lors des manœuvres d'évaluation ULNT. La mise en tension du nerf médian s'effectue généralement dans une séquence proximale à distale, c.-à-d. que les articulations proximales (p.ex., l'épaule) seront mobilisées avant les articulations distales (p.ex., le poignet). L'effet de la séquence de mise en tension a été documenté sur cadavre (M. W. Coppieters & Alshami, 2007; R. J. Nee *et al.*, 2010). Les résultats de ces études révèlent que la direction et l'amplitude d'excursion ainsi que la déformation (c.-à-d. d'élongation) du nerf médian sont similaires sans égards à la séquence de mise en tension. Toutefois, des différences significatives ont été mesurées entre le début et la fin des manœuvres d'évaluation en fonction de l'ordre de la séquence. Notamment, les mesures d'amplitude d'excursion et d'élongation du nerf médian sont supérieures, de façon transitoire, dans une séquence de mise en tension distale à proximale (R. J. Nee *et al.*, 2010). Ainsi, les techniques de glissement sont considérées moins agressives puisqu'elles favorisent l'excursion du nerf, exposant le système nerveux à moins de tension, et sont donc recommandées pour les individus atteints du STC (M. W. Coppieters & Alshami, 2007; R. Nee & Butler, 2006).

2.5.3. L'efficacité des exercices neurodynamiques

Il n'existe qu'un protocole standardisé d'exercice de mobilisation du nerf médian introduit par Totten et Hunter (1991) et initialement proposé pour la récupération post-opératoire des individus avec un STC (voir figure 9). Ce protocole propose une progression de six mouvements des doigts et du poignet dans l'optique de mobiliser le nerf au niveau du poignet. Or, ces combinaisons de mouvement favorisent l'augmentation de la pression intraneurale du nerf médian et correspondent à la définition des techniques de tension (Wright et al., 1996). Par conséquent, d'autres protocoles d'exercices ont été proposés dans l'optique de réduire l'augmentation de la pression intraneurale et maximiser l'excursion du nerf durant les exercices suivant le concept des techniques de glissement décrit dans la section précédente (voir 2.5.2). Par exemple, en évaluant différentes combinaisons de mouvements, Coppieters & Alshami (2007) ont rapporté que lors d'un mouvement d'extension du poignet de même amplitude, l'ajout d'un mouvement au coude pour contrebalancé l'élongation du nerf permet de réduire le taux d'élongation du nerf médian de 4% à 2% tout en augmentant l'amplitude d'excursion longitudinale 30%. D'autres recherches ont été conduites en employant les techniques neurodynamiques seules (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent, et al., 2009) ou en combinaison (Brininger, Rogers et al., 2007; A. Schmid et al., 2012). Ainsi, la littérature actuelle repose sur ces différents protocoles d'exercices neurodynamiques. Cette hétérogénéité pourrait expliquer, en partie, les conclusions divergentes des études actuelles évaluant l'efficacité des exercices neurodynamiques offerts aux individus atteints du STC comme souligné par deux revues systématiques récentes (Ballestero-Perez, Plaza-Manzano et al., 2017; Basson, Olivier et al., 2017). Une de ces revues systématiques a produit une méta-analyse dont les résultats sont présentés ci-dessous (voir tableau IV).

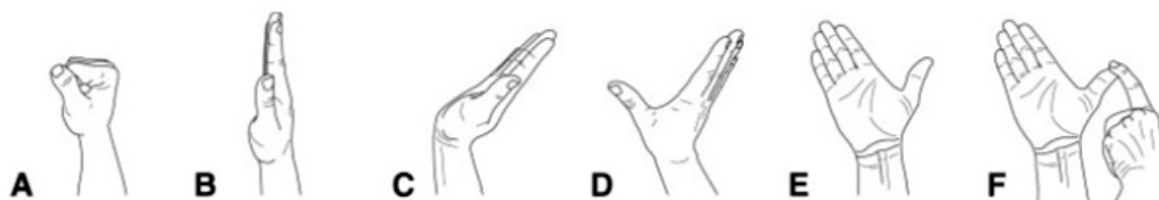


Figure 9. Exemple d'exercices de mobilisations neurodynamiques tiré du protocole de mobilisation de tendons et du nerf médian de Totten et Hunter (1991).

Tableau IV. Méta-analyse de l'efficacité des exercices neurodynamiques sur la douleur et les capacités fonctionnelles du membres supérieures chez des individus atteints du STC. Tiré de Basson *et al.* (2017)

Étude	Nombre de participants	Risque de biais*	Différence de moyenne standardisée (IC 95%)	
Douleur (EVA)			En faveur des exercices	En faveur de l'intervention contrôle
Bialosky <i>et al.</i> (2009)	N = 39	Faible	0,30 (-0,71 – 1,31)	
Baysal <i>et al.</i> (2006)	N = 24	Indéterminé	0,10 (-1,67 – 1,87)	
Pinar <i>et al.</i> (2005)	N = 30	Faible	-0,60 (-1,74 – 0,54)	
Tal Akabi et Rushton (2000)	N = 14	Faible	-0,57 (-1,73 – 0,59)	
Schmid <i>et al.</i> (2012)	N = 21	Faible	-0,30 (-1,37 – 0,77)	
Total	N = 128		-0,22 (-0,74 – 0,30) ; p = 0,40	
Fonction (DASH)				
Bialosky <i>et al.</i> (2009)	N = 39	Faible	-5,30 (-17,49 – 6,89)	
Horng <i>et al.</i> (2011)	N = 53	Faible	-2,50 (-12,08 – 7,08)	
Heebner <i>et al.</i> (2008)	N = 60	Élevé	3,11 (-8,32 – 14,54)	
Total	N = 152		-1,55 (-7,84 – 4,75) ; p = 0,60	

EVA : échelle visuelle analogue ; DASH : *Disability of the Arm, Shoulder and Hand* ; IC : interval de confiance ; *Classification du risque de biais des études inclues selon les recommandations émissent par l'approche *GRADE* (Guyatt et al. 2011)

Les résultats de la méta-analyse exposent que l'efficacité des exercices neurodynamiques demeure controversée pour réduire la douleur et améliorer les capacités fonctionnelles du membre supérieur chez les individus atteints du STC. Du même coup, les auteurs de cette étude soulignent la nécessité de poursuivre les efforts de recherche ainsi que la nécessité de spécifier clairement le type d'exercice neurodynamique utiliser comme intervention puisque les mécanismes qui sous-tendent leur efficacité demeurent incertains (Basson *et al.*, 2017). Or, une des lacunes des études précédentes est l'absence de mesure objective robuste des effets théoriques des exercices neurodynamiques sur le nerf médian. En fait, parmi les études incluses dans la méta-analyse, seulement quatre ont rapporté différentes mesures de déficiences ciblant le nerf médian. De ces quatre études, la première rapporte qu'un programme d'exercices neurodynamiques fondé sur les techniques de glissement combiné au port d'orthèse permet de réduire l'œdème intraneurale (A. Schmid *et al.*, 2012). La deuxième rapporte que des mobilisations neurodynamiques passives ciblant le glissement nerf médian sont efficaces pour réduire l'excitabilité des neurones de la corne supérieure chez des individus atteints du STC comparativement à une mobilisation factice (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent, *et al.*, 2009). La troisième rapporte que l'ajout d'exercices fondés sur le programme de Totten et Hunter au port d'orthèse et aux ultrasons thérapeutiques est efficace pour réduire la latence sensitive aux tests de conductions, mais n'a pas d'effet sur la latence motrice (Baysal *et al.*, 2006). Enfin, la quatrième étude n'a pas trouvé d'effet sur la latence de conduction motrice attribuée au programme de Totten et Hunter (Horng *et al.*, 2011). En résumé, les exercices fondés sur les techniques de glissement semblent supérieurs aux techniques de tension pour améliorer les déficiences du nerf médian chez les individus atteints du STC. Toutefois, aucune étude n'a spécifiquement évalué si un programme d'exercice neurodynamique fondée sur les techniques de glissement produisent effectivement des bénéfices supérieurs.

L'efficacité des exercices neurodynamiques offerts aux individus atteints du STC demeure controversé. Toutefois, les exercices de glissement semblent prometteurs pour améliorer les déficiences attribuées au STC

3. OBJECTIFS

3.1. Objectif général de la thèse

Bien que quelques études aient documenté des résultats favorables en réponse aux exercices neurodynamiques sur la douleur et la fonction chez des individus atteints du STC, aucune étude n'a quantifié les tenants et aboutissants des mécanismes pathophysiologiques et pathomécaniques sur l'intégrité du nerf médian au poignet (*effets périphériques*) ainsi que sur les mécanismes neurophysiologiques sur la structure et de la fonction des aires corticales motrices (*effets centraux*). Le développement des techniques d'imagerie par ultrasonographie ainsi que des applications de la stimulation magnétique transcrânienne offre l'opportunité inédite de documenter ces effets et ainsi remédier à cette lacune. Dans cette thèse, nous proposons de bonifier le corpus de connaissances relatives aux mécanismes fondamentaux d'un programme d'exercices fondé sur les mobilisations neurodynamiques à l'aide de mesures quantitatives robustes dans un contexte de soins offerts aux individus ayant un STC. Pour répondre à cet objectif général, quatre projets distincts s'articulant autour de deux volets (c.-à-d., **Volet 1** : *Mesure quantitative* et **Volet 2** : *Intervention*) qui ont guidé le développement des travaux de cette thèse.

3.2. Objectifs spécifiques de la thèse

Pour le **volet 1**, les objectifs spécifiques sont :

- Déterminer la fiabilité test-retest et le changement minimal détectable des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian obtenues à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie auprès d'un groupe formé d'individus asymptomatiques et d'individus atteints du STC (voir Article #1)
- Déterminer la validité concourante entre les mesures de l'excursion longitudinale d'un modèle artificiel de nerf médian obtenues à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie et d'un système tridimensionnel d'analyse de mouvement (voir Article #2)

Pour le **volet 2**, les objectifs spécifiques sont :

- Explorer les adaptations périphériques et centrales du nerf médian suivant un programme d'exercices neurodynamiques sur l'intégrité biologique (c.-à-d., les mesures de la morphologie, de la composition et la texture), les propriétés biomécaniques (c.-à-d., l'excursion longitudinale) du nerf médian et l'excitabilité corticospinale (c.-à-d., l'intensité des potentiels moteurs évoqués) (voir Article #3).
- Évaluer la faisabilité d'un programme d'exercices neurodynamiques préopératoire exécuté par des individus atteints du syndrome du tunnel carpien en attente d'une première chirurgie et évaluer l'efficacité de ce programme chez ces mêmes individus pour améliorer l'intégrité biologique (c.-à-d., réduction de l'aire transverse, augmentation de l'échogénicité et du contraste du nerf médian), les propriétés biomécaniques (c.-à-d., augmentation de l'excursion longitudinale) du nerf médian; réduire la douleur, les déficiences sensorimotrices et optimiser la capacité fonctionnelle du membre supérieur en comparaison à un groupe contrôle ne complétant aucun programme d'exercice avant et après la chirurgie de décompression du tunnel carpien (voir Article #4).

Les hypothèses en lien avec chaque objectif spécifique sont détaillées dans les sections avant-propos et dans l'introduction de chaque article scientifique présenté au *Chapitre 5 : Résultats*.



4. MÉTHODE

Ce chapitre sera consacré exclusivement aux éléments méthodologiques n'ayant pu être intégrés dans le format strict des articles scientifiques, notamment en apportant des détails supplémentaires sur le déroulement du doctorat, le cadre conceptuel, les participants et les mesures de résultats retenues dans cette thèse. Les éléments essentiels de la méthodologie sont inclus dans les sections correspondantes des quatre articles inclus dans cette thèse (voir *Chapitre 5 : Résultats*).

4.1. Plan du déroulement du doctorat

Ce projet d'études doctorales a débuté à la session automne 2014. Les travaux constituant le cœur de cette thèse sont divisés en deux volets qui, eux-mêmes contiennent deux projets (voir la figure 9). Le premier volet de cette thèse fut consacré à développer un montage expérimental permettant de stabiliser les segments corporels lors des manœuvres neurodynamiques ainsi que le développement d'un protocole permettant d'évaluer les mesures d'excursion longitudinale du nerf médian à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie (IQUS). Pour répondre aux objectifs spécifiques de ce volet, deux projets ont été réalisés (Articles n°1 et n°2). L'expérience acquise et les résultats obtenus ont informé les protocoles de collecte de données des projets suivants. Le deuxième volet fut consacré à la quantification des effets d'un programme de réadaptation fondé sur les exercices neurodynamiques auprès d'individus atteints du STC. Pour répondre aux objectifs spécifiques, les effets de l'intervention ont été caractérisés à l'aide de l'IQUS et de la stimulation magnétique transcrânienne (Article n°3). Enfin, la faisabilité et l'efficacité de l'intervention ont été évaluées dans le cadre d'un essai clinique randomisé (Article n°4).

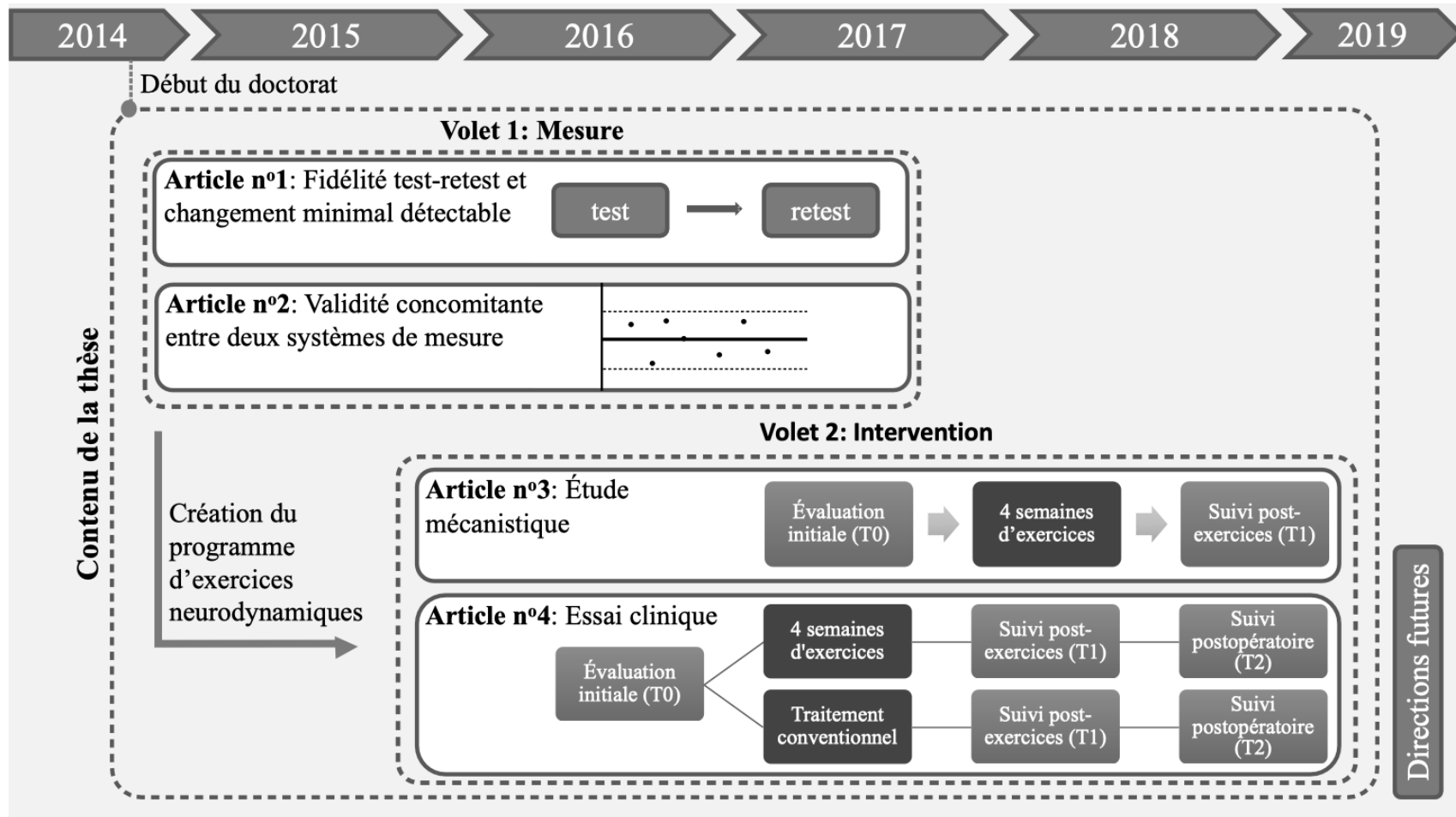


Figure 10. Chronologie et développement des projets, ainsi que les articles scientifiques qui constituent cette thèse

4.2. Cadre conceptuel

Les fondements théoriques de cette thèse sont basés sur le cadre conceptuel de la Classification internationale du Fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) (OMS, 2000). Ce cadre conceptuel structure les déficiences, limitations et restrictions potentielles d'un individu atteint d'un problème de santé. En gardant en tête l'objectif de caractériser les effets des exercices neurodynamiques, les travaux de cette thèse sont concentrés autour des éléments correspondants aux fonctions organiques et structures anatomiques, ainsi qu'aux incapacités fonctionnelles impliquées dans le STC.

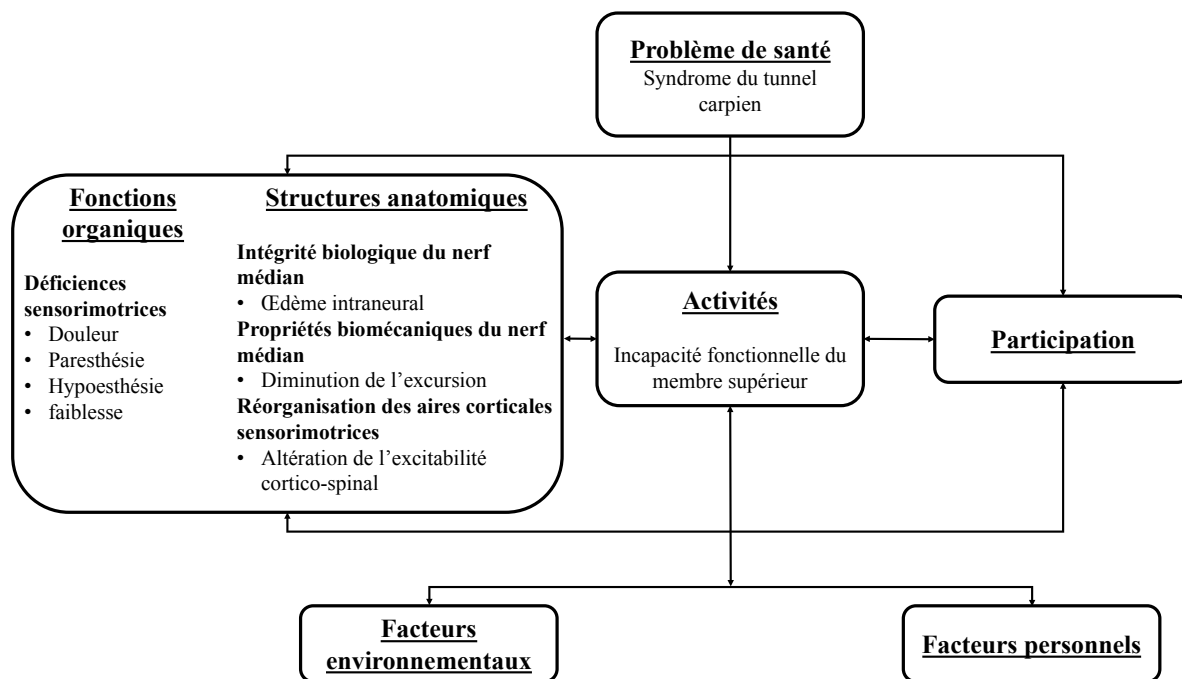


Figure 11. Cadre conceptuel de la CIF

4.3. Les participants à l'étude et stratégies de recrutement

L'expertise de l'équipe de recherche et la qualité des milieux ont assuré le bon déroulement des projets et leur approbation par les comités d'éthique du CRIR et du Centre de recherche du centre hospitalier universitaire de l'Université de Montréal (CRCHUM) (CRIR-828-0313 ; CRIR-1073-0415 ; MP-02-2016-5999, voir Annexe 1 : copie des certificats

d'éthique). Différentes approches de recrutement ont été nécessaires pour chaque projet. Tout d'abord, des individus asymptomatiques en communauté ainsi que des individus ayant récemment reçu la confirmation d'un diagnostic de STC en collaboration avec l'équipe de physiatrie affiliée à l'Institut universitaire sur la réadaptation en déficience physique de Montréal (IURDPM). Les participants potentiels étaient informés sommairement du projet par des médecins collaborateurs et consentaient verbalement à être contactés par un membre de l'équipe de recherche (Article n°1). Ensuite, une invitation par courriel a été acheminée à des individus ayant déjà consulté pour une problématique au poignet et à la main dans une clinique de physiothérapie de Montréal (Article n°3). Enfin, des individus en attente d'une première chirurgie de décompression du tunnel carpien ont été recrutés en collaboration avec le département de chirurgie plastique du CHUM (Article n°4). Lors d'une rencontre préopératoire avec leur chirurgien, les participants potentiels étaient initialement mis au courant du projet de recherche. Les individus démontrant un intérêt pour le projet étaient ensuite contactés en personne ou via un entretien téléphonique avec un membre de l'équipe de recherche afin d'être informés du contenu de l'étude et d'évaluer leur éligibilité. Les critères d'inclusion et d'exclusion, ainsi que les détails démographiques des participants sont présentés dans les articles scientifiques respectifs (voir *Chapitre 5 : Résultats*). Un sommaire de l'ensemble des participants recrutés et des principales mesures de résultats colligées est présenté à la figure 5 afin d'illustrer le poids relatif des projets. Au total, 62 participants, dont 51 atteints du STC ont été recrutés pour les différents projets. En tout, 4 020 examens d'imagerie par ultrasonographie ont été analysés dont 708 images statiques et 3 312 séquences dynamiques du nerf médian. Aussi, 3 640 stimulations magnétiques ont été effectuées et autant de potentiels moteurs évoqués ont été analysés.

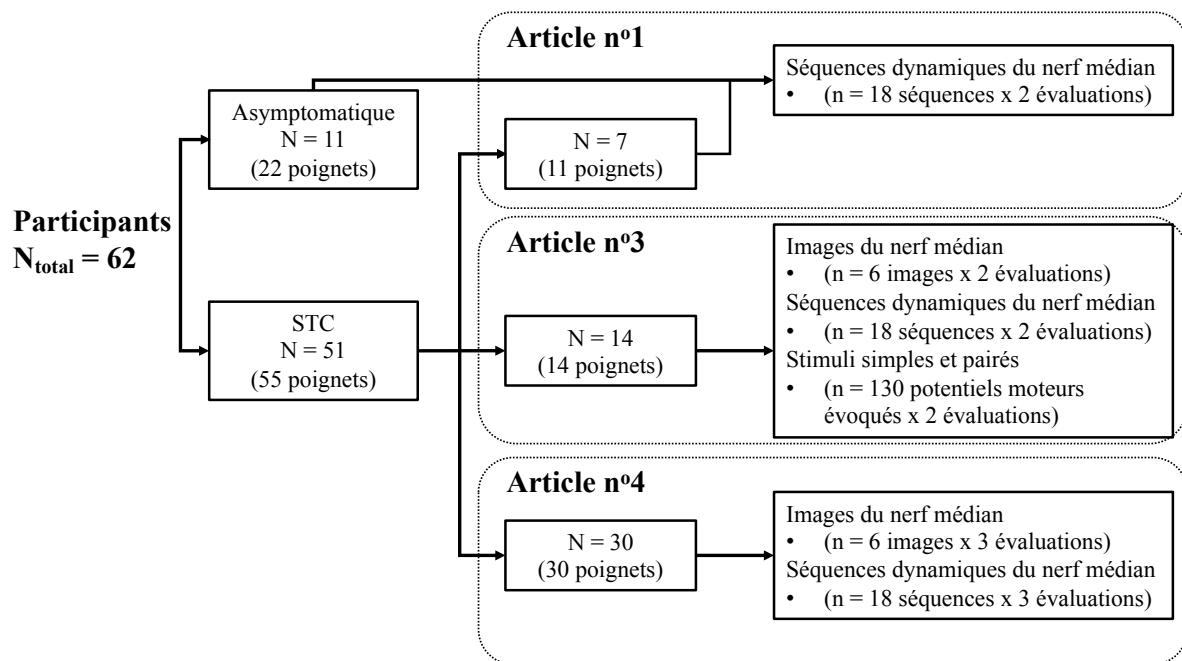


Figure 12. Schéma des différents devis expérimentaux ainsi que des principales mesures de résultats utilisés dans le cadre de cette thèse

4.4. Évaluations

Les participants étaient invités à se présenter à l'un des deux sites des projets (c.-à-d., au laboratoire de pathokinésiologie situé à l'IURDPM ou au CHUM) afin de procéder à l'administration des différentes mesures à l'étude. En résumé, ces séances comportaient l'administration d'évaluations cliniques des déficiences sensorimotrices (questionnaires standardisés, examen physique) et d'évaluations en laboratoire de l'intégrité biologique et des propriétés biomécanique du nerf médian et de l'excitabilité corticospinale (imagerie quantitative par ultrasonographie et stimulation magnétique transcrânienne). Les outils de mesure employés lors de ces évaluations sont décrits brièvement dans les prochains paragraphes alors qu'ils sont détaillés dans les articles correspondants au *Chapitre 5*. Une attention particulière est portée à la description des critères d'évaluation des tests physiques qui n'ont pu être décrits en détail dans les articles scientifiques en raison des contraintes imposées par les éditeurs.

4.4.1. Questionnaires

Deux questionnaires standardisés ont été retenus pour mesurer les changements en réponse aux exercices neurodynamiques. Le *Disability of Shoulder, Arm and Hand questionnaire* (DASH) a permis de caractériser les incapacités fonctionnelles des membres supérieurs (Hudak, Amadio, & Bombardier, 1996). L'inventaire West Haven-Yale de la douleur (WHYMPI) a permis de caractériser la douleur et son impact sur les activités de la vie quotidienne, en plus de mesurer la détresse affective, le soutien social et l'auto-perception du handicap (Kerns, Turk, & Rudy, 1985). Le choix des questionnaires fut basé sur la pertinence de leurs qualités métrologiques ainsi que la disponibilité d'une version validée en français (Bergström, Jensen *et al.*, 1999; Durand, Vachon *et al.*, 2005; Greenslade, Mehta *et al.*, 2004; Laliberté, Lamoureux *et al.*, 2008). Les qualités métrologiques du questionnaire DASH ont été analysées auprès d'une population atteinte de divers troubles musculosquelettiques, incluant des individus ayant un STC en attente ou ayant reçu une chirurgie (Beaton, Katz *et al.*, 2001; Greenslade *et al.*, 2004; Gummesson, Atroshi, & Ekdahl, 2003). Les qualités métrologiques du questionnaire WHYMPI ont été analysées auprès d'une population atteinte de douleur chronique (Kerns, Turk, & Rudy, 1985; Laliberté *et al.*, 2008). Toutefois, ce questionnaire a déjà été employé comme mesure de résultats auprès d'une population atteinte du STC (Breuer *et al.*, 2006).

4.4.2. Mesure des déficiences sensorimotrices

Des tests cliniques ont permis de caractériser les déficiences sensorimotrices, particulièrement l'hypoesthésie et la faiblesse de la main, associées au STC. Le seuil de sensibilité fut estimé à l'aide des monofilaments de Semmes-Weinstein. Ce test est sensible pour déceler les troubles précoces et légers de la fonction nerveuse et est corrélé avec la sévérité d'un STC (Raji, Ansari *et al.*, 2014). Durant la procédure, le participant est assis face à une table à l'opposé de l'évaluateur. La main testée est placée en supination sur une serviette et cachée par un écran placé entre la main et le participant. Le monofilament est appliqué sur la région testée à trois reprises. La commande est : « dites oui lorsque vous sentez le filament ». Le seuil normal (c.-à-d. monofilament de 2,83) est le point de départ du test et le grade est noté sur une échelle de comportant six catégories où un grade faible indique une déficience sévère.

Tableau V. Évaluation des seuils de perception tactile (tiré de Raji et al.(2014))

Grade	Monofilament	Force (g)	Interprétation
6	1,65 - 2,83	0,008 – 0,07	Normal
5	3,22 – 3,61	0,16 – 0,4	Touché léger diminué
4	3,84 – 4,31	0,6 – 2	Sensation de protectrice diminuée
3	4,56 – 4,93	4 – 8	Sensation de protectrice perdue
2	5,07 – 5,88	10 – 60	-
1	6,10 – 6,55	100 – 300	Sensation à la pression profonde seulement

Le test de discrimination deux-points (*Weber's Two-Point discrimination test*) permet d'apprécier la densité de l'innervation d'une région cutanée et serait également corrélé avec la réorganisation corticale. Il est recommandé pour évaluer les individus atteints du STC (Bell-Krotoski, 2011; Tecchio *et al.*, 2002). Il est toutefois rarement anormal dans les premiers stades du STC. Durant la procédure, le participant est placé dans la même position que l'évaluation précédente. À l'aide d'un esthésiomètre, on applique des pressions à l'éminence thénar, à la pulpe (face palmaire) de la phalange distale du pouce et à la pulpe de la phalange distale du majeur. Les stimuli sont appliqués sur chaque région dans un ordre aléatoire (1 pointe vs. 2 pointes) pour un minimum de 10 répétitions à un intervalle d'environ deux secondes. À chaque région testée, la distance interpointe est modulée jusqu'à ce que le sujet puisse identifier correctement (c.-à-d., 8 fois sur 10) s'il a été touché par une ou deux pointes (Nolan, 1982).

Tableau VI. Évaluation du test de discrimination deux points (tiré de la American Society of Hand Therapist (*Magee, 2008*))

Grade	Distance entre deux points	Interprétation
4	< 6 mm	Normal
3	6 – 10 mm	juste
2	11 – 15 mm	faible
1	Un point perçu	protection
0	Aucun point perçu	anesthésie

La force des muscles du pouce est évaluée par dynamométrie à l'aide d'une pince hydraulique bi-digitale. La pince entre la pulpe du pouce et de l'index est la plus spécifique au STC puisqu'elle dépend principalement de l'innervation du nerf médian (J. Geere, Chester, Kale, & Jerosch-Herold, 2007). La commande au participant est : « serrer la pince entre votre

index et le pouce le plus fort possible. » Trois essais ont été réalisés sous encouragements verbaux similaires entre chaque répétition. Une diminution de force au test de pince serait le plus valide pour détecter une atteinte axonale et indique généralement un stade de STC plus avancé (Jo Geere, Chester, Kale, & Jerosch Herold, 2007).

Deux tests cliniques spécifiques, les tests de Tinel et de Phalen, associés au syndrome du tunnel carpien ont été complétés. Le test de Tinel consiste à effectuer des percussions sur la partie ventrale du poignet. L'apparition de douleur ou de paresthésie est interprétée comme étant un résultat positif. La sensibilité du test de Tinel varie entre 48% et 73%, alors que sa spécificité varie entre 30% et 94% (Lifchez, Means *et al.*, 2010). Le test de Phalen consiste à demander à l'individu de fléchir ses poignets et de tenir cette position durant 60 secondes. L'apparition de douleur ou de paresthésie sont interprétées comme étant un résultat positif et indique que l'intégrité du nerf médian au poignet est atteinte. La sensibilité de ce test pour détecter un STC varie entre 67% et 83%, alors que sa spécificité varie entre 40% et 98% (Lifchez *et al.*, 2010). Ces tests sont couramment utilisés en clinique, mais également en recherche pour objectiver le nombre d'individus chez qui le nerf médian est « sensibilisé » aux stimuli mécaniques au niveau du poignet (Akalin, El *et al.*, 2002; Baysal *et al.*, 2006; Pinar *et al.*, 2005; Rozmaryn *et al.*, 1998). La présence d'une réponse positive à ces deux tests semble améliorer légèrement leur valeur diagnostic. En fait, une étude rapporte que la combinaison d'une réponse positive au test de Tinel, de Phalen et d'une distribution classique des symptômes sur le diagramme de la main de katz produit un rapport de vraisemblance positif de 3,5 (Wainner, Fritz *et al.*, 2005).

4.4.3. Mesures par ultrasonographie

Les mesures de l'intégrité biologique et des propriétés dynamiques du nerf médian ont été acquises à l'aide d'un système d'imagerie par ultrasonographie. Les paramètres d'enregistrement d'images ont été sélectionnés par consensus de l'équipe de recherche afin d'obtenir des images standardisées de qualité dans un effort de minimiser l'impact sur certaines mesures quantitatives (p.ex., l'échogénicité).

4.4.3.1. Protocole d'imagerie

Des images et des séquences vidéo du nerf médian ont été enregistrées bilatéralement pour chaque participant dans des positions standardisées selon les études. Les participants étaient installés en décubitus dorsal sur une table spécialement conçue munie du support pivotant pour la tête, d'un appui limitant l'élévation des épaules et d'un support maintenant le coude en extension complète (voir figure 13). Les images statiques du nerf médian étaient enregistrées dans le plan transverse et longitudinal sur la face ventrale du poignet au niveau du tunnel carpien. L'enregistrement des séquences vidéo était réalisé à 3 cm en proximal du tunnel carpien durant l'exécution d'une manœuvre neurodynamique combinant l'extension passive du poignet avec l'inclinaison ipsilatérale du cou (c.-à-d. glissement) et, par la suite, avec l'inclinaison controlatérale (c.-à-d. tension). L'épaule était maintenue à 45° d'abduction durant l'évaluation. Cette position et ces séquences de mouvements ont été retenues afin d'optimiser la fiabilité et la précision des mesures d'excursion (cf., Article n°1). Une attention particulière était portée au positionnement et à la pression exercée par la sonde sur le nerf médian pour limiter l'impact sur les mesures à l'étude.



Figure 13. Photo du protocole d'imagerie, notez la position standardisée du membre supérieur

4.4.3.2. Analyse des images statiques

Les images ont été analysées par un logiciel sur mesure développé par l'équipe de recherche dans l'environnement MATLAB (Image Processing Toolbox, the Mathworks, Natick, MA). Dans un premier temps, un évaluateur identifiait le nerf médian dans les plans transverse et longitudinal (voir figure 14). Dans le plan transverse, l'évaluateur plaçait des marqueurs à l'intérieur du contour hyperéchoïque du nerf médian qui représente l'épinerve. Ensuite, le logiciel traçait et liait automatiquement les marqueurs d'un trait circulaire délimitant la région d'intérêt (ROI). Dans le plan longitudinal, l'évaluateur procédait de façon similaire en plaçant des marqueurs sur la bordure supérieure et inférieure du nerf médian. Toutefois, seule une section d'un centimètre de long du nerf médian était sélectionnée en utilisant le rebord distal du radius comme repère. Ce choix fut informé à la lumière de travaux précédents sur l'IQUS et considérant que les changements caractéristiques du nerf médian dans le STC surviennent à l'entrée du canal carpien (M.-J. Nadeau, Desrochers, Lamontagne, Larivière *et al.*, 2016).

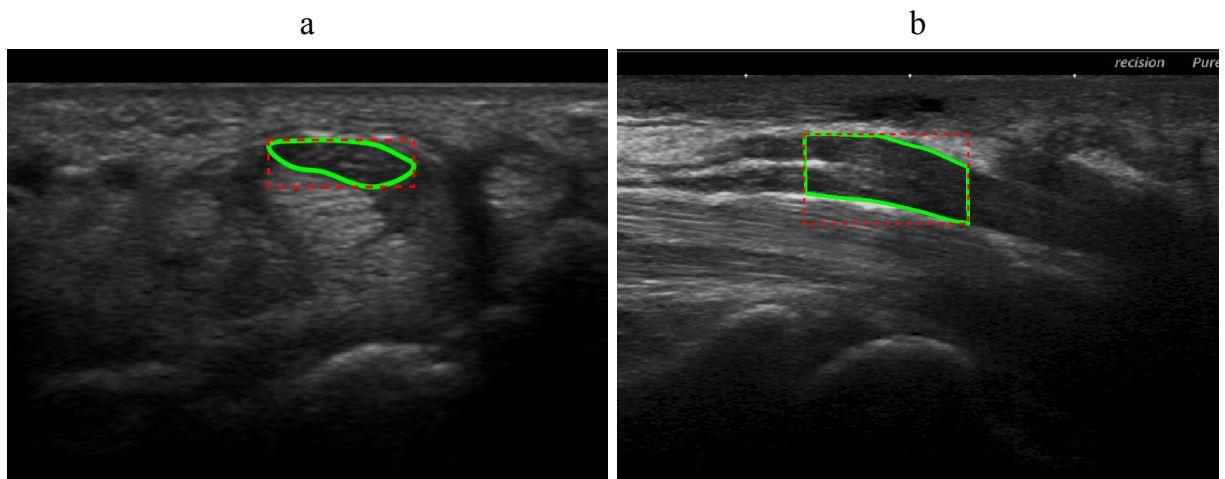


Figure 14. Images a) transverse et b) longitudinale du nerf médian au niveau du tunnel carpien par ultrasonographie. Notez la délimitation des ROIs en vert sur le contour du nerf médian

Dans un deuxième temps, différentes mesures quantitatives sont extraites à partir de ces ROIs et peuvent être regroupées en trois catégories : géométrique, composition, texture (voir également figure 15). Dans cette thèse, deux mesures géométriques sont proposées pour caractériser les ROIs soit l'aire transverse (uniquement pour les images transversales) et l'épaisseur (uniquement pour les images longitudinales). L'aire transverse était déterminée par

le nombre de pixels inclus dans la ROI multiplié par l'aire d'un pixel. L'épaisseur était déterminée en traçant cent points équidistants dans la ROI de 1 centimètre reliant les bordures supérieure et inférieure du nerf. La moyenne de la distance entre les bordures était définie comme l'épaisseur du nerf. Quant aux mesures de composition et de texture, ces dernières sont inspirées de travaux précédents portant sur la caractérisation du nerf médian et du tendon d'Achille (Impink *et al.*, 2010; M.-J. Nadeau, 2014). Les mesures de composition et de texture sont issues de l'analyse des ROIs à l'aide de paramètres statistiques de premier ordre [c.-à-d. : moyenne (échogénicité), variance, coefficient d'aplatissement (kurtosis), coefficient d'asymétrie (*skewness*), entropie] et de paramètres statistiques de deuxième ordre (c.-à-d. : contraste, énergie et homogénéité). Les fondements mathématiques des paramètres statistiques sont disponibles en annexe (voir annexe IV).

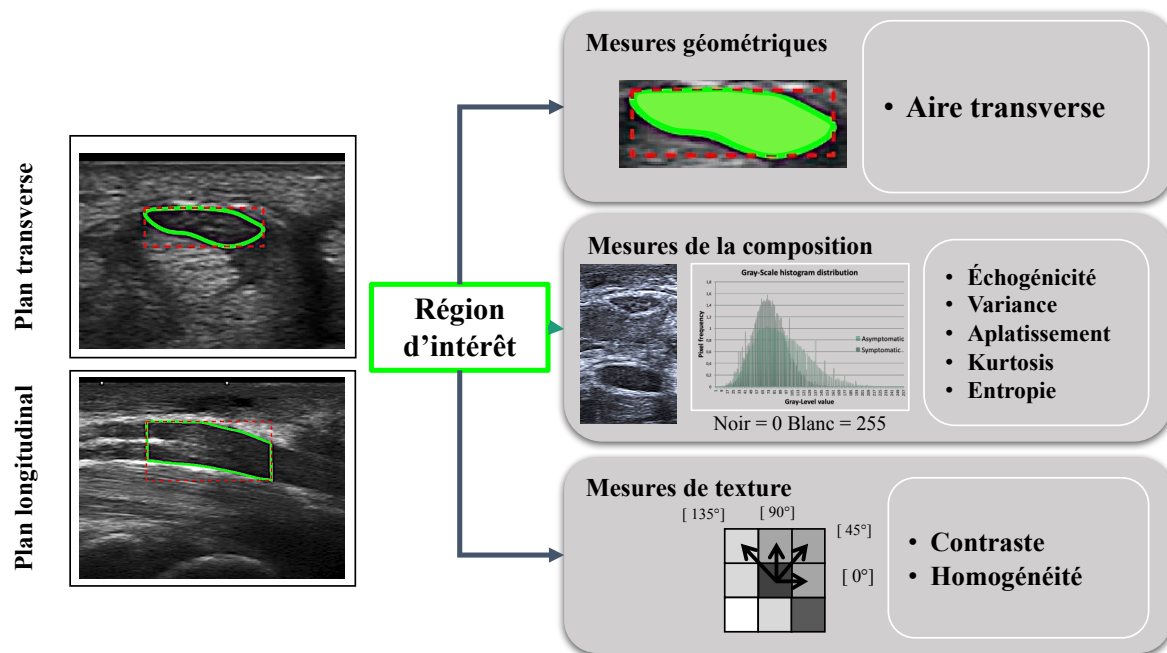


Figure 15. Analyses des images statiques du nerf médian par ultrasonographie incluant les mesures géométriques, les mesures de la composition et de texture

4.4.3.3. Analyse des images dynamiques

Pour chaque séquence vidéo, le nerf médian était d'abord identifié dans le plan longitudinal par ses marges supérieure et inférieure (voir figure 16). L'excursion longitudinale du nerf a été quantifiée à l'aide d'un algorithme de corrélation conformément à la méthode

proposée par Dilley et al. (Andrew Dilley *et al.*, 2003) Brièvement, cet algorithme est fondé sur la reconnaissance de la « signature » des pixels contenus dans une ROI donnée. En d'autres termes, l'échogénicité des pixels qui forment le nerf diffère de ceux qui forment les tissus environnants. L'algorithme agit en trois phases : 1) les coordonnées de la ROI sélectionnée sont enregistrées, 2) une matrice est formée à partir des pixels contenus dans la ROI, 3) différentes itérations du déplacement de la matrice sont exécutées entre chaque image instantanée ou « frame » de la séquence vidéo. L'itération ayant obtenu la plus forte corrélation est ensuite interprétée comme étant le déplacement des pixels qui formaient la ROI initiale. Ce processus est répété jusqu'à la fin de la séquence vidéo qui comporte approximativement 150 à 200 images instantanées. Cet algorithme permet donc de caractériser l'amplitude, la vitesse et la direction des déplacements du nerf médian en fonction du temps.

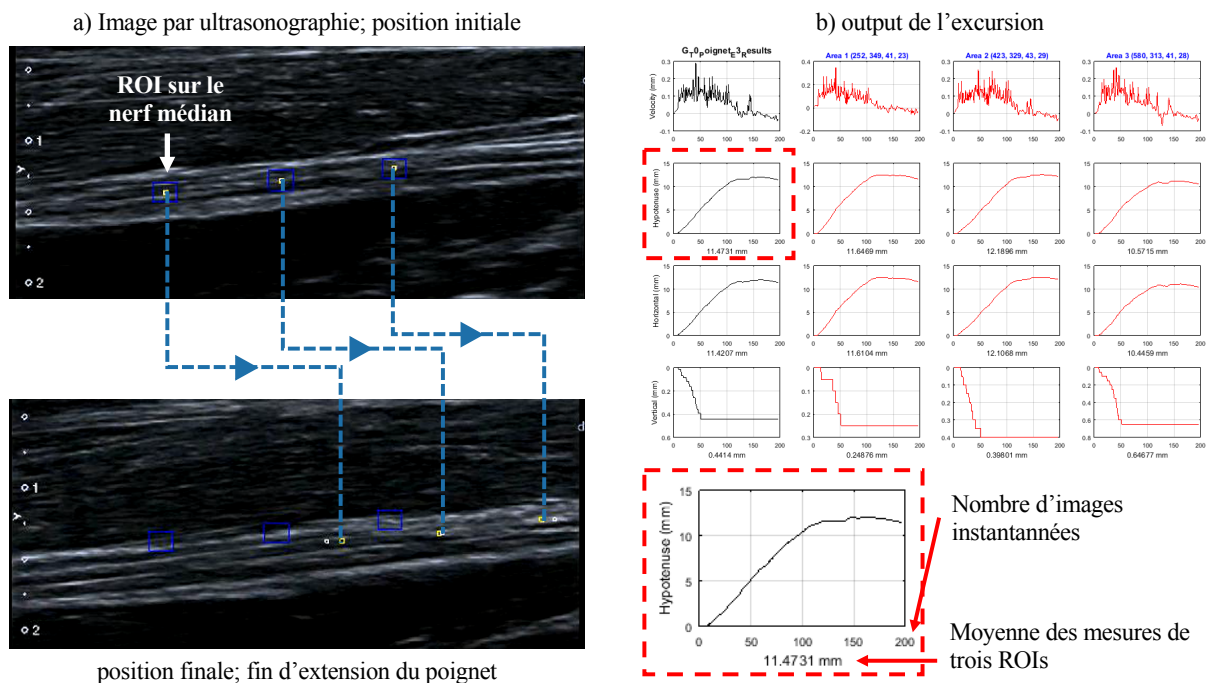


Figure 16. Analyse de l'excursion du nerf avec a) les ROIs manuellement sélectionnées le long du nerf médian avec le déplacement correspondant des pixels et b) le tableau des résultats

4.4.4. Mesures par stimulation magnétique transcrânienne

Les effets des exercices neurodynamiques sur la structure et la fonction des aires corticales motrices associées au poignet et à la main ont été évalués à l'aide de potentiels

moteurs évoqués (PME) produits par la stimulation magnétique transcrânienne (SMT). Le PME représente le signal électromyographique obtenu par des électrodes de surface appliqué sur un muscle en périphérique (ici le muscle court abducteur du pouce). Une relation sigmoïdale entre l'intensité des stimuli de SMT et l'amplitude du PME permet d'évaluer les modulations de l'excitabilité des voies corticospinales.

4.4.4.1. Protocole de stimulation et analyse des signaux

Des stimuli simples ont été transmis à l'aide d'une bobine en « 8 » connectée à un appareil de stimulation magnétique transcrânienne Magstim BiStim2^{md} (voir figure 17). Les participants étaient confortablement assis sur une chaise munie de support pour les coudes. Après une courte préparation de la peau visant à diminuer l'impédance (c.-à-d. friction avec un tissu abrasif et nettoyage avec une solution d'alcool isopropylique 70%), des électrodes de surface étaient disposées en configuration bipolaire sur le corps musculaire du court abducteur du pouce et la première articulation métacarpophalangienne afin d'enregistrer l'amplitude et la latence des PME. Tout d'abord, la meilleure région permettant d'éliciter des PME ou « hotspot » était identifiée et confirmée en appliquant un quadrillage de 4-8 stimuli tests à 1 cm aux alentours de la région précédemment identifiée. La localisation exacte de la région corticale stimulée (c.-à-d. au-dessus de la région du cortex moteur controlatéral à la main évaluée) était ensuite enregistrée à l'aide d'un système de neuronavigation Brainsight^{md} (Rogue, Montréal) jumelé à l'appareil de SMT. Ensuite, les stimulations étaient répétées sur cette même région afin de déterminer l'excitabilité cortico-motrice en colligeant différentes mesures analysées à l'aide d'un logiciel développé par l'équipe de recherche basé sur l'environnement LabView^{md} :

- Le seuil moteur (SM) ou « *resting motor threshold* » est utilisé en recherche pour ajuster individuellement l'intensité de la stimulation émise par l'appareil de SMT. Le SM est défini par l'intensité de stimulation minimale permettant d'obtenir un PME d'au moins 50 μ V dans le muscle cible au repos de façon reproductible, c.-à-d. plus de 50% des PME obtenus consécutivement lors de 10 essais (Rossini *et al.*, 2015). Le SM est rapporté en pourcentage du potentiel de stimulation maximale de l'appareil de SMT et utilisé pour tracer la pente de stimulus-réponse.

- La pente stimulus-réponse ou « *input-output curve* » reflète l'augmentation de l'amplitude des PME en fonction de l'intensité de stimulation par l'appareil de SMT suivant une fonction sigmoïdale (Rossini *et al.*, 2015). L'augmentation de la pente est associée à une augmentation de l'excitabilité de la voie corticospinale (Stagg, Bestmann *et al.*, 2011). La pente stimulus-réponse est définie par huit ensembles de stimuli effectués dans un ordre randomisé. L'intervalle interstimuli était de 10 secondes et l'intensité était comprise dans un intervalle débutant à 10% sous le SM de chaque individu (SM – 10%) et incrémenté de 10% subséquent jusqu'au seuil ne produisant plus d'augmentation d'amplitude des PME.
- L'inhibition intracorticale ou « *Short Interval intraCortical Inhibition (SICI)* » et la facilitation intracorticale ou « *IntraCortical Facilitation (ICF)* » reflètent différents mécanismes d'inhibition ou de facilitation intracorticale. Les mécanismes du SICI sont en grande partie attribués à l'inhibition postsynaptique physiologique suivant une stimulation corticale (Rossini *et al.*, 2015). Cette inhibition peut être influencée par la médication qui potentialise les récepteurs *gamma-aminobutyric acid* (GABA) et par des douleurs neurogènes chroniques, tel le STC (Schwenkreis *et al.*, 2010). Les mécanismes du ICF demeurent partiellement connus, mais impliqueraient une excitation des circuits glutaminergiques du cortex moteur primaire (Rossini *et al.*, 2015). Les SICI et ICF sont définis à l'aide de stimulations paires ou « *paired-pulse stimulation* ». Pour ce faire, deux stimuli d'une intensité de 80% du SM (situation conditionnement) et d'une intensité approximative de 120% du SM (situation test) sont employés à différents intervalles de stimulation court ou long. Un intervalle interstimuli court (c.-à-d., 3 millisecondes) permet d'obtenir le SICI et un intervalle interstimuli long (c.-à-d., 15 millisecondes) permet d'obtenir le ICF. Un total de 10 stimulations étaient employées pour chacune des mesures.

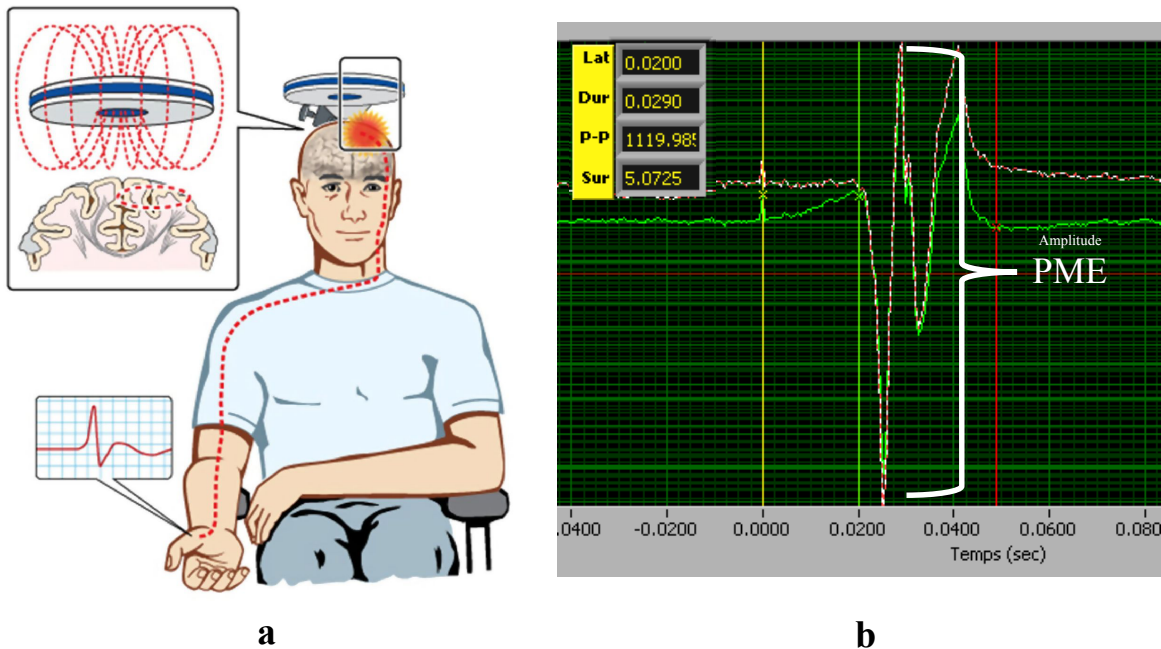


Figure 17. a) Illustration démontrant l'application d'une bobine de SMT au-dessus de la région corticale correspondante à l'aire motrice primaire de la main et b) le potentiel moteur évoqué correspondant tel qu'enregistré en laboratoire où l'amplitude est extraite de la distance entre les pics identifiés par la parenthèse. Tiré de (Vucic, Ziemann *et al.*, 2013). Lat = latence, Dur = durée, P-P = distance pic-à-pic, Sur = surface.

4.5. Analyses statistiques

Les différentes démarches et outils statistiques employés pour vérifier les hypothèses des travaux de cette thèse sont présentés en détail dans les sections correspondantes des différents articles scientifiques (voir chapitre 5).

5. RÉSULTATS

Les principaux résultats de cette thèse reposent sur quatre articles scientifiques qui sont en processus de révision ou publiés dans des revues scientifiques dotés de comités de révisions par les pairs. Les revues scientifiques ciblées se concentrent sur des domaines d'étude relatifs à la réadaptation, la biomécanique et l'imagerie médicale. La contribution de chaque auteur ainsi qu'un avant-propos sont regroupés sur la page de présentation de chaque article.

1. ***Repeatability and Minimal Detectable Change of Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging.*** Cet article a été publié dans la revue *Ultrasound in Medicine and Biology*. Les auteurs sont: Philippe Paquette, Martin Lamontagne, Johanne Higgins, Dany H. Gagnon.
2. ***Comparison of Longitudinal Excursion of a Nerve-Phantom Model Using Quantitative Ultrasound Imaging and Motion Analysis System Methods : A Convergent Validity Study.*** Cet article a été publié dans la revue *Ultrasound*. Les auteurs sont : Philippe Paquette, Youssef El Khamlichi, Martin Lamontagne, Johanne Higgins, Dany H. Gagnon.
3. ***Exploration of peripheral and central adaptations following a median nerve neuromobilization program among individuals with carpal tunnel syndrome: A mechanistic study using quantitative ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation.*** Cet article a été accepté pour publication dans la revue *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*. Les auteurs sont: Philippe Paquette, Johanne Higgins, Dany H. Gagnon.
4. ***Effects of a preoperative neuromobilization program offered to individuals with carpal tunnel syndrome awaiting carpal tunnel decompression surgery: a pilot randomized controlled study.*** Cet article sera soumis pour révision initiale dans la revue *Journal of Hand therapy*. Les auteurs sont: Philippe Paquette, Johanne Higgins, Dr Michel Alain Danino, Dr Patick Harris, Dr Martin Lamontagne, Dany H. Gagnon.

5.1. Article n°1: Repeatability and Minimal Detectable Change of Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging

Philippe Paquette*, MSc, PT^{1,2}, Martin Lamontagne, MD^{1,3}, Johanne Higgins, OT, PhD^{1,2}, Dany H. Gagnon, PhD, PT^{1,2}

¹ Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal-Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal, Montreal, Canada

² School of Rehabilitation, Faculty of Medicine, Université de Montréal, Montreal, Canada

³ Department of physical medicine and rehabilitation, Centre Hospitalier de l'Université de Montréal

Article publié dans la revue *Ultrasound in Medicine and Biology* le 11 mars 2015

À titre d'auteur principal, j'ai contribué significativement et majoritairement à l'élaboration du protocole expérimental et de la méthodologie, ainsi qu'à la réalisation de la collecte de données, l'analyse et l'interprétation des résultats, de même qu'à la rédaction du manuscrit. Dr Lamontagne, a contribué à titre de consultant pour son expertise en lien avec l'imagerie par ultrasonographie. Les professeurs Higgins et Gagnon ont contribué au développement du protocole et de la méthodologie en plus de superviser l'analyse et l'interprétation des résultats ainsi que la rédaction du manuscrit. Tous les auteurs ont contribué significativement à la révision du contenu intellectuel du manuscrit et ont approuvé la version finale pour publication.

5.1.1. Avant-propos

Les physiothérapeutes utilisent souvent des manœuvres neurodynamiques (c.-à-d., *Upper Limb Neurodynamic Test*) pour évaluer l'irritabilité et la mobilité du nerf médian chez les individus atteints du syndrome du tunnel carpien qui les consultent. Or, les physiothérapeutes ne disposent que d'outils indirects (p. ex., symptômes auto-rapportés ou mesures d'amplitude articulaire par goniométrie) pour objectiver leur évaluation. En fait, aucun outil n'est disponible pour quantifier, *in vivo*, les propriétés biomécaniques du nerf médian. L'imagerie quantitative par ultrasonographie, dont les applications sont en émergence en réadaptation, apparaît pertinente pour surmonter cette lacune. Or, les quelques études qui soutiennent les qualités métrologiques des mesures d'excursion longitudinale de nerfs périphériques obtenues par l'IQUS, s'intéressent presque qu'exclusivement au nerf médian, ainsi qu'au nerf sciatique. À ce jour, seuls deux rapports préliminaires rapportent une petite erreur de mesure et une excellente fidélité pour le nerf médian [$<10\%$ d'erreur (A. Dilley *et al.*, 2001) ; SEM = 0,66 mm, MDC = 1,84 mm (M. Coppieters, Hough, & Dilley, 2009)]. Cependant, seules des preuves limitées sont disponibles, en particulier chez une population atteinte du STC.

Il importe de souligner la collaboration du Prof. Andrew J. Dilley de l'*University College of London* qui a gentiment accepté de partager une portion d'un logiciel d'analyse des séquences vidéo d'imagerie par ultrasonographie développé par son équipe. Ce logiciel a été adapté au besoin de ce projet par l'équipe de recherche du CRIR – site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal et a facilité la mise en place du protocole d'analyse des mesures d'excursion de nerf utilisé dans cette thèse.

L'objectif spécifique de cette étude visait à déterminer la fidélité test-retest ainsi que le changement minimal détectable de mesures d'excursion longitudinale du nerf médian par imagerie quantitative par ultrasonographie et s'inscrit dans le volet #1 de cette thèse.

5.1.2. Abstract

This study determined test-retest reliability and minimum detectable change of longitudinal median nerve excursion during upper limb neurodynamic tests (ULNTs). Seven participants with unilateral or bilateral carpal tunnel syndrome and 11 healthy participants were randomly tested with two ULNTs (i.e., tensioner and slider). Each ULNT was performed three times at 45° and 90° of shoulder abduction, respectively, on two separate visits. Video sequences of median nerve excursion, recorded by a physical therapist using ultrasound imaging, were quantified using computer software. The generalizability theory, encompassing a G-Study and a D-study, measured the dependability coefficient (ϕ) along with standard error of measurement (SEM) accuracy and allowed various testing protocols to be proposed. The highest reliability ($\phi=0.84$) and lowest minimal measurement error ($SEM=0.58$ mm) of the longitudinal median nerve excursion were reached during the ULNT-slider performed with 45° of shoulder abduction and when measures obtained from three different image sequences recorded during a single visit were averaged. It is recommended that longitudinal median nerve excursion measures computed from three separate image sequences recorded during a single visit be averaged in clinical practice. Ideally, adding a second visit (6 image sequences) is also suggested in research protocols.

Key Words:

Carpal tunnel syndrome, median nerve, neurodynamics, reliability, ultrasound

5.1.3. Introduction

When assessing people with carpal tunnel syndrome (CTS), physical therapists frequently perform upper limb neurodynamic tests (ULNTs) to stress peripheral nerves (McLellan and Swash 1976, Walsh 2005). The ULNTs generally combine distal (e.g., wrist extension) and proximal (e.g., neck side flexion) joint movements to either increase longitudinal tension along the nerve continuum (i.e., tensioner) or release longitudinal tension and favour nerve excursion (i.e., slider) (Coppieters and Butler 2008). Musculoskeletal (MSK) ultrasound imaging of the median nerve allows rehabilitation professionals to gain additional insight into the effects of ULNTs on the neuromechanics of the median nerve (Dilley, Lynn et al. 2003, Echigo, Aoki et al. 2008). The use of MSK ultrasound imaging allows clinicians to document reliable and precise geometric and grey-scale related measures of the median nerve using static images in mixed populations (Alemàn, Bernà et al. 2008, Impink, Gagnon et al. 2010). As for its reliability and precision when measuring longitudinal median nerve excursion during dynamic manoeuvres (i.e., ULNTs), preliminary reports showed excellent reliability and small error of measurement (SEM) for the median nerve (SEM=0.66 mm; MDC=1.84 mm) (Coppieters, Hough et al. 2009) and sciatic nerve (SEM=0.09-0.21 mm; MDC=0.24-0.59) (Ellis, Hing et al. 2008). However, only limited evidence is available, particularly among individuals with CTS.

This study determined test-retest reliability and minimum detectable change of longitudinal median nerve excursion during ULNTs using MSK ultrasound imaging. The longitudinal median nerve excursion measures were expected to achieve good test-retest reliability ($\Phi \geq 0.75$) and accuracy ($SEM_{REL} \leq 15\%$).

5.1.4. Materiel and Methods

5.1.4.1. Participants

Seven participants with unilateral or bilateral (N=5) CTS confirmed by electromyography testing (2 males, 5 females; mean age= 56 ± 6 years; time since CTS started: 4 ± 2.7 years) and 11 healthy participants (6 males, 5 females; mean age= 37 ± 13 years) were recruited. Participants were screened to exclude systemic conditions associated with CTS such

as diabetes, rheumatoid arthritis, pregnancy, recent treatment (i.e., < three months) involving cortisone infiltration and previous carpal tunnel surgery. This study was approved by the Research Ethics Committee of the Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal (CRIR-828-0313).

5.1.4.2. Laboratory Assessment

While resting supine on a table with external supports for the upper limb and head, participants were randomly tested with two ULNTs using a standardized protocol (i.e., tensioner and slider). For each ULNT, a trained physical therapist applied a passive full wrist extension while the participants simultaneously performed cervical lateral flexion. Depending of the ULNT being tested, either contralateral neck lateral flexion (i.e., tensioners) or ipsilateral neck lateral flexion (i.e., sliders) was performed (Figure 18). For practical consideration, full elbow extension and neutral shoulder rotation positions were maintained during the UNLTs. The influence of shoulder rotation is likely negligible considering that shoulder external rotation was reported to increase strain on median nerve by less than 0.5% when assessed distally (Byl, Puttlitz et al. 2002). Each ULNT was performed three times (T) at 45° and 90° of shoulder abduction (SH_{ABD}), respectively. Each ULNT was repeated during a second visit (V) separated by a 30-minute rest period from the first visit. During all ULNTs, video sequences of median nerve excursion were recorded by a trained physical therapist in the longitudinal plane three centimeters proximal to the wrist crease using a 5-12-MHz 55 mm linear transducer connected to a HD11 XE ultrasound machine (Philips Medical Systems, Bothell, Washington). All ultrasound parameters (e.g., depth, gain, focus zone) remained constant across participants.

5.1.4.3. Main outcome measure

Longitudinal median nerve excursion was measured during each video sequence using a computerized frame-by-frame decisional algorithm proposed by Dilley et al. (2001). After identifying the median nerve and visualizing the median nerve excursion, three regions of interest (ROI) were manually marked on the first image of each video sequence at the proximal, middle, and distal portions of the median nerve. These ROIs were initially marked within the nerve fascicles and thereafter tracked using pixel pattern recognition until the end of the video

sequence (i.e., end of the ULNT). The longitudinal median nerve excursion of each of the three ROIs was computed as the absolute median nerve excursion before being averaged (Figure 19).

5.1.4.4. Statistics

Test-retest reliability was assessed using the generalizability theory and computed with the GENOVA program. The G-study first determined the magnitude of the variance attributed to the participant (P), the systematic errors related to the visit (V) and the image (I), and the random errors resulting from the interactions between these different sources of variance (PV, PI, VI, PVI) (Roebroeck, Harlaar et al. 1993). The dependability coefficient (Φ), ranging between 0 (null reliability) and 1 (perfect reliability), was subsequently computed to determine the reliability. As a general guideline, dependability coefficient $\Phi \geq 0.75$ can be interpreted as good (Portney and Watkins 2009). The standard error of measurement (SEM) was determined by the root square of the absolute error variance. The minimal detectable change (MDC) was calculated using a 90% confidence level (see equation 5.1.1) (Haley and Frigala Pinkham 2006). Both SEM and MDC were normalized against the overall mean value of each ULNT (i.e., SEM_{NORM} , MDC_{NORM}) to facilitate interpretation. A D-study quantified the error reduction for hypothetical testing protocols averaging diverse numbers of images or visits and their effects on the dependability coefficient (Φ), SEM_{NORM} , and MDC_{NORM} .

$$MDC_{90\%} = \frac{1.65 \times \sqrt{2} \times SEM}{Mean_{pooled}} * 100 \quad (\text{equation 5.1.1})$$

5.1.5. Results

The average excursion for the tensioner ULNT reached 4.056 ± 1.899 mm and 4.411 ± 1.612 mm for SH_{ABD} at 45° and 90° respectively, whereas it reached 4.011 ± 1.424 mm and 4.218 ± 1.687 mm for SH_{ABD} at 45° and 90° respectively during the slider ULNT. The results of the G-Study and D-study are summarized in Tables 1 and 2. G-study (Table VII) results reveal that participants (P) only accounted for 47.75% to 76.25% of the total variance across all ULNTs. The results also highlight that participant-visit interaction (PV) was substantial as it accounted for 11.07% to 31.67% of the variance across all ULNTs. The unexplained variance (participant-visit-image interaction) varied between 11.98% and 18.81% across all ULNTs. The D-study (Table VIII) results confirm that various hypothetical testing protocols incorporating

an increased number of images ($I=1, 2$, or 3) or visits ($V=1$ or 2) yield a favourable increase in dependability coefficients and decrease in absolute and normalized SEMs and MDCs.

5.1.6. Discussion

The highest source of total variance attributable to differences between participants was observed during the ULNT-slider with 45° SH_{ABD} (76.23%) and ULNT-tensioner with 90° SH_{ABD} (67.15%). These large percentages represent the proportion of variance free of error, which is desirable for optimizing the reliability coefficient. The small percentages of total variance associated with the image or visit confirms that no systematic increase or decrease exists between images ($\leq 1.77\%$) or visits ($\leq 0.24\%$). The PV interaction, found to be a substantial error variance component (11.07%-31.67%), suggests that some participants may have performed quite differently between the two visits. For example, the fact that participants were instructed to actively bring their neck in lateral flexion during the ULNTs may have been troublesome, from a motor control perspective, for some participants and may explain, in part, this finding. Although the experimental setting could be improved, the way the ULNTs were performed almost perfectly mimics current clinical practice. As for the effects of shoulder positions, they were found to be opposite between the two ULNTs and remain difficult to interpret though they may relate to specific neurodynamic aspects or specific participant characteristics. The present results are promising since one ULNT (i.e., slider at 45° SH_{ABD}) demonstrated good test-retest reliability ($\phi \geq 0.75$) and accuracy ($SEM \leq 15\%$) when averaging three images ($I=3$) measured during a single visit ($V=1$). Averaging three additional images ($I=3$) obtained during a second visit ($V=2$) increases reliability (+12%) and reduces both SEM and MDC (-29%). Although such a protocol may be difficult to implement in clinical practice, it definitively deserves consideration in research protocols. This recommendation remains conservative given the fact that the limited number of individuals with CTS, when compared to the number of healthy participants, may have lowered between-participant variance.

5.1.7. Conclusion

Musculoskeletal ultrasound imaging represents a useful tool for evaluating longitudinal median nerve excursion during ULNTs routinely performed by physical therapists in clinical

practice and research protocols. Repeatability and precision of longitudinal median nerve excursion measured during ULNTs are optimized when averaging values from at least three images obtained during a single visit in clinical practice, and ideally during two visits in research protocols. The best repeatability and precision was reached when performing a ULNT-slider with 45° SH_{ABD} among the ULNTs tested in the present study. Ongoing research will investigate the validity and responsiveness of longitudinal median nerve excursion measures among a large cohort of individuals with CTS and healthy counterparts.

5.1.8. Acknowledgements:

The authors thank Daniel Marineau, Hakim Mecheri and Maria Kandiliotis for their technical, engineering, and clinical assistance, respectively. The authors also wish to thank Prof. Andrew J. Dilley, University College of London, for agreeing to share the frame-by-frame image analysis program adapted for the present study.

This study was funded in part by a Junior 1 Research Career Award from the Fonds de la recherche du Québec-Santé and a Research Award from the Faculty of Medicine of Université de Montréal. The equipment and material required for the research completed at the Pathokinesiology Laboratory was financed by the Canada Foundation for Innovation and the Institut de recherche Robert Sauvé en santé et sécurité au travail. Philippe Paquette received a scholarship from the Ordre professionnel de la physiothérapie du Québec to complete a pre-doctoral rehabilitation research intership.

Tableau VII. Results of the G-Study showing the magnitude of variance components expressed as a percentage of the total variance for each source of variance and interactions for all ULNTs assessed.

ULNTs	Sources of relative variance (%)							Total
	P	V	I	PV	PI	VI	PVI	
Tensioner 45° SH _{ABD}	47.75	0.00	1.77	31.67	0.00	0.00	18.81	100.00
Tensioner 90° SH _{ABD}	67.15	0.00	0.00	11.54	1.81	0.72	18.78	100.00
Slider 45° SH _{ABD}	76.23	0.00	0.73	11.07	0.00	0.00	11.98	100.00
Slider 90° SH _{ABD}	49.70	0.24	0.00	28.41	4.05	0.00	17.51	100.00

ULNTs = Upper Limb Neurodynamic Tests

Tableau VIII. Results of the D-Study obtained with different designs involving 1 or an average of 2 or 3 images measured during 1 or 2 visits. Bold results indicate those which achieved good test-retest reliability ($\Phi \geq 0.75$) and accuracy ($SEM_{REL} \leq 15\%$).

	Hypothetical Testing Designs					
	V = 1 I = 1	V = 1 I = 2	V = 1 I = 3	V = 2 I = 1	V = 2 I = 2	V = 2 I = 3
Tensioner 45° SH_{ABD}						
Φ	0.49	0.54	0.56	0.65	0.70	0.72
SEM-abs	1.21	1.09	1.05	0.86	0.77	0.74
SEM-rel%	30.49	27.50	26.43	21.56	19.45	18.69
MDC _{90%} -abs	2.82	2.55	2.45	2.00	1.80	1.73
MDC _{90%} -rel%	71.14	64.17	61.67	50.30	45.37	43.61
Tensioner 90° SH_{ABD}						
Φ	0.70	0.77	0.79	0.82	0.87	0.88
SEM-abs	0.89	0.74	0.68	0.63	0.52	0.48
SEM-rel%	20.34	16.90	15.59	14.55	12.05	11.10
MDC _{90%} -abs	2.09	1.73	1.59	1.48	1.22	1.13
MDC _{90%} -rel%	48.02	39.77	36.61	33.96	28.12	25.89
Slider 45° SH_{ABD}						
Φ	0.77	0.82	0.84	0.87	0.90	0.91
SEM-abs	0.71	0.61	0.58	0.50	0.43	0.41
SEM-rel%	18.08	15.55	14.61	12.78	11.00	10.33
MDC _{90%} -abs	1.66	1.43	1.34	1.17	1.01	0.95
MDC _{90%} -rel%	42.19	36.29	34.10	29.83	25.66	24.11
Slider 90° SH_{ABD}						
Φ	0.54	0.58	0.60	0.70	0.74	0.75
SEM-abs	1.00	0.90	0.87	0.71	0.64	0.61
SEM-rel%	23.87	21.48	20.61	16.92	15.23	14.63
MDC _{90%} -abs	2.34	2.11	2.02	1.66	1.49	1.43
MDC _{90%} -rel%	55.85	50.27	48.27	39.49	35.55	34.13

SEM: standard error of measurement; abs: absolute; rel: relative; MDC: minimal detectable change.

Figure legends:

- Figure 18. Schematic representation of the ULNT sequences showing contralateral neck side flexion with simultaneous wrist extension (tensioners) performed at (A) 45° of shoulder abduction and (B) 90° of shoulder abduction as well as ipsilateral neck side flexion with simultaneous wrist extension (sliders) performed at (C) 45° of shoulder abduction and (D) 90° of shoulder abduction.
- Figure 19. Musculoskeletal ultrasound image of the longitudinal view of the median nerve over which three distinct regions of interest (ROIs) are manually outlined alongside the median nerve before being tracked using a computerized image analysis program developed using MATLAB toolboxes to quantify its longitudinal excursion.

FIGURE 18

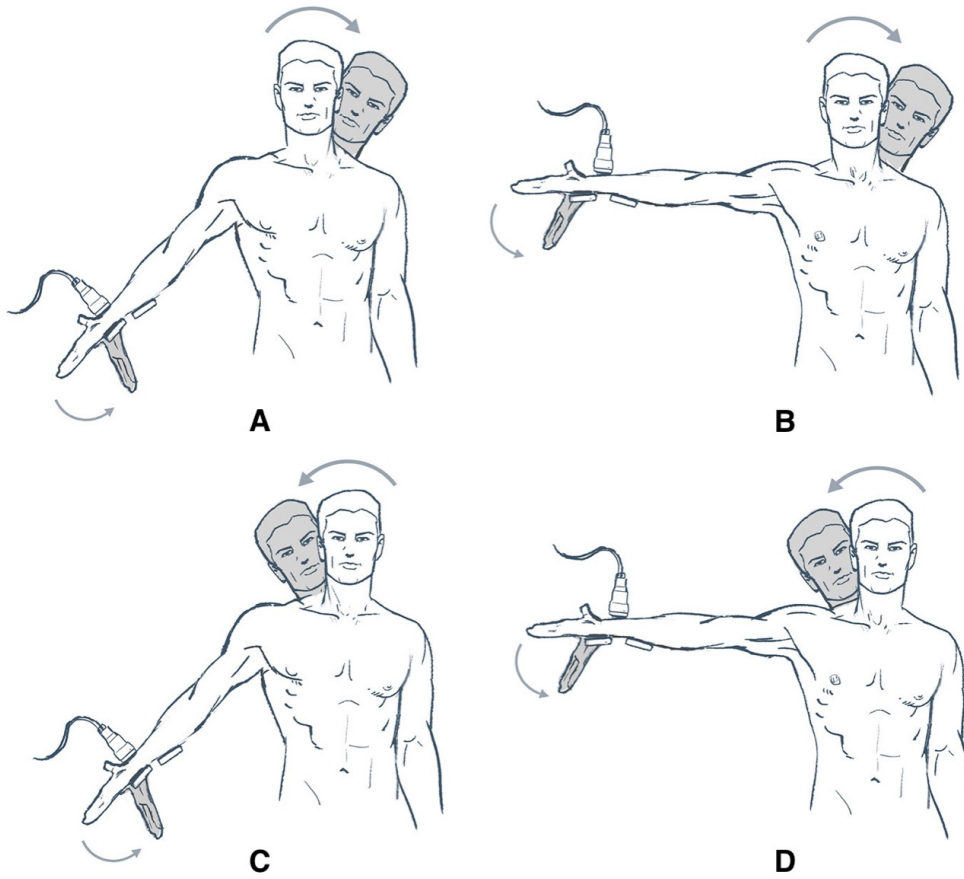
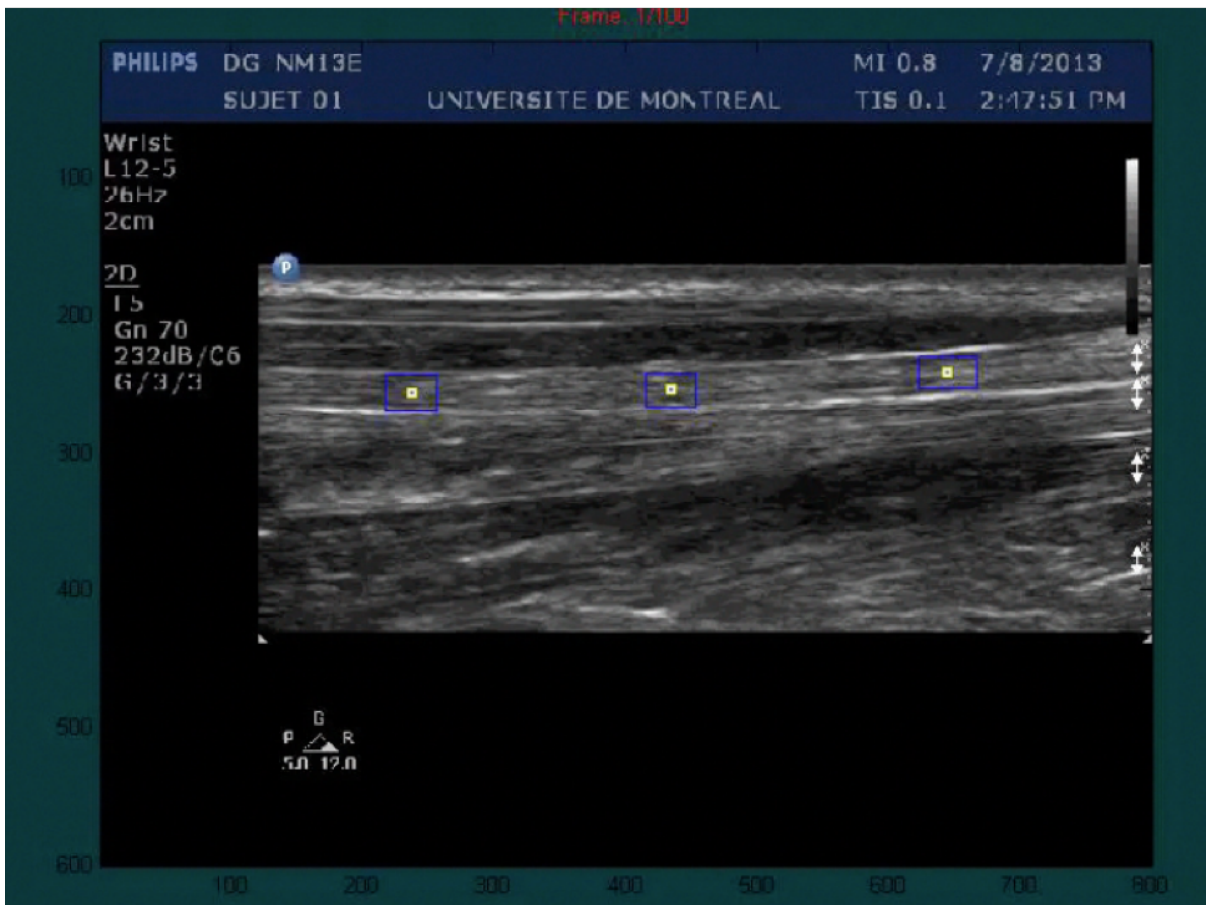


FIGURE 19



5.1.9. References

- Alemán, L., J. Bernà, M. Reus, F. Martinez, G. Doménech Ratto and M. Campos (2008). "Reproducibility of sonographic measurements of the median nerve." Journal of ultrasound in medicine **27**(2): 193-197.
- Byl, C., C. Puttlitz, N. Byl, J. Lotz and K. Topp (2002). "Strain in the median and ulnar nerves during upper-extremity positioning." The Journal of hand surgery - American volume. **27**(6): 1032-1040.
- Coppieters, M. and D. Butler (2008). "Do 'sliders' slide and 'tensioners' tension? An analysis of neurodynamic techniques and considerations regarding their application." Manual Therapy **13**(3): 213-221.
- Coppieters, M., A. Hough and A. Dilley (2009). "Different nerve-gliding exercises induce different magnitudes of median nerve longitudinal excursion: an in vivo study using dynamic ultrasound imaging." The Journal of orthopaedic and sports physical therapy **39**(3): 164-171.
- Dilley, A., B. Lynn, J. Greening and N. DeLeon (2003). "Quantitative in vivo studies of median nerve sliding in response to wrist, elbow, shoulder and neck movements." Clinical Biomechanics **18**(10): 899-907.
- Echigo, A., M. Aoki, S. Ishiai, M. Yamaguchi, M. Nakamura and Y. Sawada (2008). "The excursion of the median nerve during nerve gliding exercise: an observation with high-resolution ultrasonography." J Hand Ther **21**(3): 221-227; quiz 228.
- Ellis, R., W. Hing, A. Dilley and P. McNair (2008). "Reliability of measuring sciatic and tibial nerve movement with diagnostic ultrasound during a neural mobilisation technique." Ultrasound in medicine & biology **34**(8): 1209-1216.
- Haley, S. and M. Fragala Pinkham (2006). "Interpreting change scores of tests and measures used in physical therapy." Physical Therapy **86**(5): 735-743.
- Impink, B. G., D. Gagnon, J. L. Collinger and M. L. Boninger (2010). "Repeatability of ultrasonographic median nerve measures." Muscle & Nerve **41**(6): 767-773.
- McLellan, D. L. and M. Swash (1976). "Longitudinal sliding of the median nerve during movements of the upper limb." J Neurol Neurosurg Psychiatry **39**(6): 566-570.
- Portney, L. G. and M. P. Watkins (2009). Foundations of clinical research: applications to practice, Person Prentice Hall.
- Roebroeck, M. E., J. Harlaar and G. J. Lankhorst (1993). "The application of generalizability theory to reliability assessment: an illustration using isometric force measurements." Physical Therapy **73**(6): 386-395; discussion 396.
- Walsh, M. T. (2005). "Upper limb neural tension testing and mobilization. Fact, fiction, and a practical approach." J Hand Ther **18**(2): 241-258.

5.2. Article n°2: Comparison of Longitudinal Excursion of a Nerve-Phantom Model Using Quantitative Ultrasound Imaging and Motion Analysis System Methods: A Convergent Validity Study

Philippe Paquette, MSc^{1,2}, PT; Youssef El Khamlichi, MSc(c), Eng¹; Martin Lamontagne, MD^{1,3}; Johanne Higgins, PhD, OT^{1,2}; Dany H Gagnon, PhD, PT^{1,2}

¹Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal – Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal, Canada

²School of Rehabilitation, Faculty of Medicine, Université de Montréal, Canada

³Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Centre Hospitalier de l'Université de Montréal, Canada

Article publié dans la revue *Ultrasound* en août 2017.

À titre d'auteur principal, j'ai contribué significativement et majoritairement à l'élaboration du protocole expérimental et de la méthodologie, ainsi qu'à la collecte de données, l'analyse et l'interprétation des résultats. J'ai rédigé le manuscrit sous la supervision de mes directeurs de recherche. Youssef El Khamlichi a contribué à l'élaboration de la méthodologie et la collecte de donnée. Dr Lamontagne, a contribué à titre de consultant pour son expertise en lien avec l'imagerie par ultrasonographie. Les professeurs Higgins et Gagnon ont contribué au développement du protocole et de la méthodologie en plus de superviser l'analyse et l'interprétation des résultats ainsi que la rédaction du manuscrit. Tous les auteurs ont contribué significativement à la révision du contenu intellectuel du manuscrit et ont approuvé la version finale pour publication.

5.2.1. Avant-propos

Notre revue de la littérature a révélé que très peu d'études ont éprouvé la validité de la mesure d'excursion longitudinale de nerf périphérique. Des résultats favorables ont été avancés dans la foulée du développement du programme d'analyse d'excursion de nerf utilisé dans cette thèse (A. Dilley *et al.*, 2001). Les auteurs de cette étude rapportent notamment que les mesures acquises avec l'imagerie par ultrasonographie sont relativement libres d'erreur (<10%). Toutefois, l'interprétation de ces résultats est compliquée par l'absence de graphique de Bland et Altman, ainsi que l'absence d'analyse de corrélation entre les mesures. En fonction de l'expertise présente au laboratoire de Pathokinésiologie du CRIR – site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal et des moyens à notre disposition, nous avons entrepris de créer un modèle artificiel reproduisant un nerf périphérique *in situ* afin de comparer des déplacements contrôlés de ce modèle mesurés à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie et d'un système d'analyse du mouvement en 3D. Cette étude avait pour objectif spécifique d'évaluer la validité convergente de mesures d'excursion longitudinale du nerf médian par imagerie quantitative par ultrasonographie et s'inscrit dans le volet #1 de cette thèse.

5.2.2. Abstract

Background: Quantitative ultrasound imaging is gaining popularity in research and clinical settings to measure the neuromechanical properties of peripheral nerves such as their capability to glide in response to body segment movement. Increasing evidence suggests that impaired median nerve longitudinal excursion is associated with carpal tunnel syndrome. To date, psychometric properties of longitudinal nerve excursion measurements using quantitative ultrasound imaging have not been extensively investigated.

Methods: This study aims to investigate the convergent validity of longitudinal nerve excursion by comparing measures obtained using quantitative ultrasound imaging with those determined with a motion analysis system. A 38-cm long rigid nerve-phantom model was used to assess longitudinal excursion in a laboratory environment. The nerve-phantom model, immersed in a 20-cm deep container filled with a gelatin-based solution, was moved using a forward and backward motion 20 times. Three light-emitting diodes were used to record nerve-phantom excursion with a motion analysis system, while a 5-cm linear transducer allowed simultaneous recording via ultrasound imaging.

Results: Both measurement techniques yielded excellent association ($r = 0.99$) and agreement (mean absolute difference between methods = 0.85 mm; mean relative difference between methods = 7.48 %). Small discrepancies were largely found when larger excursions (i.e., > 10 mm) were performed, revealing slight underestimation of the excursion by the ultrasound imaging analysis software.

Conclusion: Quantitative ultrasound imaging is an accurate method to assess longitudinal excursion of an *in-vitro* nerve-phantom model and appears relevant for future research protocols investigating neuromechanical properties of peripheral nerve.

Keywords

Sonography, In vitro, Musculoskeletal, Physiotherapy, Median Nerve

5.2.3. Introduction

In carpal tunnel syndrome (CTS), thickening of synovial tissue within the carpal tunnel, chronic compression and nerve tethering are known pathological contributors that can lead to adherence of the median nerve (Ibrahim, Khan et al. 2012). Increasing evidence suggests that median nerve longitudinal excursion is associated with CTS (Hough, Moore et al. 2007, Filius, Scheltens et al. 2015). Nerve-gliding techniques are routinely used in clinical rehabilitation practice for their potential neuromechanical effects such as peripheral nerve excursion (i.e., gliding) and intraneural tension changes (i.e., tensioning) (Coppieters and Butler 2008, Echigo, Aoki et al. 2008, Coppieters, Hough et al. 2009). Nerve-gliding techniques consist of specific mobilization aiming to take peripheral nerves across their available range of motion (Butler 2000) and could theoretically reduce adhesions and facilitate excursion (Ettema, Zhao et al. 2007, Ellis and Hing 2008). Limited evidence is available on the efficacy of rehabilitation programs based on nerve-gliding techniques although potential beneficial effects have been reported in terms of reduced pain intensity (Pinar, Enhos et al. 2005, Heebner and Roddey 2008), decreased need for surgery (Rozmaryn, Dovellet et al. 1998) and inhibitory effects pertaining to nociceptive neuronal pool located at the spinal cord level (i.e., dorsal horn neurons) (Bialosky, Bishop et al. 2009). Surprisingly, no studies have quantified the potential effects of rehabilitation programs based on nerve-gliding techniques by directly investigating the biological or neuromechanical property of the nerve despite suggestions emerging from previous studies (Rozmaryn, Dovellet et al. 1998, Ellis and Hing 2008, Coppieters, Hough et al. 2009).

The use of quantitative ultrasound imaging (QUI) and advanced image analysis software now enables rehabilitation professionals to acquire additional information for optimal care planning and treatment decisions (Dilley, Greening et al. 2001, Desmeules, Minville et al. 2004, Whittaker and Stokes 2011). Nonetheless, measuring longitudinal nerve excursion using real-time ultrasound imaging remains a challenge since peripheral nerves are continuous anatomical structures with no definite starting and ending points and have an uncertain dynamic trajectory when body segments are moved (Dilley, Lynn et al. 2003, Walsh 2005). Over the past decade, two image analysis methods with embedded decisional algorithms have been proposed in the literature to quantify dynamic longitudinal nerve excursion and both have predominantly

focused on the median nerve: (1) tracking of tissue speckles within regions of interest (ROI) (Dilley, Greening et al. 2001), and (2) use of spectral analysis of the ultrasound pulse repetition frequency variation (i.e., Doppler effect) (Hough, Moore et al. 2000). To date, psychometric properties of longitudinal nerve excursion measurements using QUI have not been extensively investigated, although currently available reports have confirmed excellent reliability and a small error of measurement (SEM) for the median nerve (SEM = 0.41-1.21 mm; MDC = 0.95-2.82 mm) (Coppieters, Hough et al. 2009, Paquette, Lamontagne et al. 2015) and sciatic nerve (SEM = 0.09-0.21 mm; MDC = 0.24-0.59 mm) (Ellis, Hing et al. 2008). Furthermore, current studies using this method have also revealed different nerve excursion directions (i.e., caudal and cephalic) when testing different movement combinations linked to nerve-gliding techniques (Dilley, Odeyinde et al. 2008, Coppieters, Hough et al. 2009). Yet, the strength of the evidence pertaining to the validity of nerve excursion measures computed with QUI is relatively weak.

To further define the psychometric properties of this method, this study aims to investigate the convergent validity (i.e., association and agreement between measures) between longitudinal nerve-phantom excursion measures computed with QUI analysis software and a motion analysis system (i.e., the gold standard). Good convergent validity is expected between these two methods (correlation between measures ≥ 0.75 ; absolute difference between measures ≤ 0.95 mm) (Coppieters, Hough et al. 2009, Paquette, Lamontagne et al. 2015).

5.2.4. Methods

Nerve-phantom model: A homemade preparation was made using gelatin, psyllium hydrophilic mucilloid fiber and boiling water placed in a rectangular-shaped cardboard container (8 cm X 20 cm) (Bude and Adler 1995). For convenience, an acrylonitrile butadiene styrene tubule (cross-sectional area = 18.02 mm²; length = 38 cm) was used as a nerve-phantom given its relative rigidity and echogenic appearance on ultrasound imaging. The internal constitution of the nerve-phantom is comparable, in terms of grey shade variation and organisation, to one of a peripheral nerve. Once the preparation had hardened in the refrigerator, the tubule was carefully introduced into the container. Figure 20 provides further assembly details.

Laboratory assessment: One of the investigators manually moved the nerve phantom to the left (N = 12 trials) and to the right (N = 8 trials) for a total of 20 trials ranging in excursion. Nerve-phantom excursions were recorded simultaneously via ultrasound imaging and a 3-dimensional (3D) kinematic analysis system. To synchronize acquisition between the two systems, a second investigator applied a ‘flick’ to one end of the nerve phantom. This perturbation was visible on the recordings of both methods and served as the starting point for data analysis.

Quantitative ultrasound imaging system: A video sequence of each longitudinal nerve-phantom excursion was acquired using a frame rate of 24 Hz with an ultrasound system encompassing a 12-5 MHz 55 mm linear array transducer connected to an ultrasound machine (HD11 XE, Philips Medical Systems, Bothell, Washington) (Figure 21). The ultrasound parameters (i.e., depth = 3 cm, gain = 50; transducer frequency = 12 MHz) remained constant during the experiment. The transducer was properly positioned on the preparation and aligned with the nerve phantom before being secured in place with external supports. Thereafter, all video sequences were uploaded into a desktop computer and analyzed using an in-house image analysis program developed in MATLAB using the Image Processing Toolbox™ software (The MathWork Inc., Natick, Massachusetts, USA; license R2015a) according the method proposed by Dilley et al. (2001) This programs relies on a frame-by-frame decisional algorithm method that records the pixel pattern within three regions of interest (ROIs), manually positioned along the nerve phantom by the investigators, before tracking their displacements between consecutive image frames of a video sequence with a block-matching process. Specifically, these three ROIs were defined along the nerve phantom (proximal, middle and distal portions) and the mean displacement of the three ROIs was computed to quantify the longitudinal nerve excursion of each trial. A video sequence presenting one nerve-phantom glide as well as the displacement of the three ROI required to compute the nerve-phantom excursion using the computer program, is available in electronic supplementary material.

Motion analysis system: During each longitudinal nerve-phantom excursion, the trajectory of three light-emitting diodes attached to either end of the nerve phantom (modeled as a rigid body) was recorded at a sampling frequency of 24 Hz using a three-dimensional motion analysis system within the calibrated frame of reference used to fix the 3D orthogonal

coordinate system of the laboratory. This three-dimensional motion analysis system, which combined three synchronized camera units (Model 3020; NDI Technology Inc., Waterloo, Ontario, Canada), reached an estimated global root mean square error of 0.39 mm. For each trial, light-emitting diode trajectories (i.e., X', Y', and Z' axis) were filtered by applying two passes of a non-weighted moving average of $n = 40$ points at each sample point 't' of the displacement (x). Each pass is equivalent to:

$$\bar{x}_t = \frac{x_t + x_{t-1} + \dots + x_{t-(n-1)}}{n} \quad (\text{equation 5.2.1})$$

where \bar{x}_t and x_t represent the filtered and unfiltered data, respectively. We combined the data of the three light-emitting diodes using the mean of each filtered trajectory. The nerve-phantom model was carefully inserted horizontally and perfectly aligned with the X' axis of the calibrated 3D orthogonal coordinate system of the laboratory. Moreover, the nerve-phantom model was embedded into the XY plane of the laboratory (i.e., perfect alignment with the sagittal plane). Hence, the longitudinal excursion of the nerve-phantom model, recorded simultaneously with the ultrasound imaging and motion analysis systems, occurred in the same plane of movement in the direction of the X' axis (Figure 5.2.1). Therefore, only the mean of the filtered data obtained in the X' and Y' axes served to determine the excursion computed with the motion analysis system. The excursion was determined following the same procedure found in the QUI software using the formula:

$$\sqrt{(X_i^2 - X_{ii}^2) + (Y_i^2 - Y_{ii}^2)} \quad (\text{equation 5.2.2})$$

where X_i and X_{ii} refer to adjacent displacements obtained in the X' axis and similarly in the Y' axis. The total amount of excursion was determined by the summation of the displacement increments.

Data analysis: The strength of the association between the two measurement techniques was determined using a Pearson product-moment correlation coefficient (r); the absolute agreement and the 95% limits of agreement (mean difference ± 1.96 * standard deviation of the difference) were calculated according to the method proposed by Bland and Altman (1986). We also sought to control for any potential association between the magnitude of differences between the two methods and the velocities of the nerve-phantom excursion and computed a

Pearson product-moment correlation coefficient (r) between these two variables. The r values were interpreted according to the following guidelines: poor ($r \leq 0.20$), fair ($r = 0.21-0.40$), moderate ($r = 0.41-0.60$), good ($r = 0.61-0.80$) and very good association ($r = 0.81-1.00$) (Altman 1991). Data were analyzed using SPSS (version 21.0). The level of significance was set at $p > 0.05$.

5.2.5. Results

On average, the mean (SD) nerve excursions computed using the QUI method were 10.91 (4.60) mm or 11.79 (4.47) mm with the motion analysis method. An excellent association ($r = 0.99$; $p < 0.01$) was found for the nerve-phantom longitudinal excursion measures computed with the two methods (Figure 22a). The mean absolute difference between the two measurement methods was -0.85 mm (range: -2.40 mm to 0.29) with 95% limits of agreement of -2.33 mm to 0.63 mm (Figure 22b). A moderate association between the differences between the two measurement methods and the nerve excursion velocity as measured via ultrasound imaging was found ($r = -0.51$; $p = 0.02$) (Figure 22c). Hence, nerve excursion velocity only explains 26.2% (R^2) of the variance observed.

5.2.6. Discussion

The very good association found between the two measurement methods tested in the present study supports the convergent construct validity of the ultrasound imaging and motion analysis system methods used to compute longitudinal excursion of the nerve-phantom model. The mean difference between the longitudinal nerve-phantom excursion (absolute $\Delta=0.85$ mm; relative $\Delta=7.48$ %), which does not exceed the minimal detectable change value (i.e., 0.95 mm) reported in the literature for the QUI measurement of median nerve excursion (Paquette, Lamontagne et al. 2015), further supports the hypothesis that almost equivalent longitudinal nerve-phantom excursions are computed for the two measurement techniques tested. Hence, the use of QUI for quantifying longitudinal excursion of peripheral nerves (e.g., median nerve) is promising and may prove useful in clinical practice or as part of a research protocols in the future. However, careful interpretation of the measures is warranted when quantifying longitudinal nerve excursion since the QUI-based method often underestimates the longitudinal

nerve-phantom excursion compared to the motion analysis system method, mainly when the longitudinal nerve-phantom excursion exceeds 10 mm. Interestingly, studies reporting longitudinal peripheral nerve excursions using the QUI technique have reported excursions < 10 mm when this method of measurement is used, for example, at the median nerve (Erel, Dilley et al. 2003, Greening, Dilley et al. 2005) or sciatic nerve (Ellis, Hing et al. 2008). One potential explanatory factor of the differences computed between methods was investigated (i.e., effect of velocity of the nerve-phantom longitudinal displacement) and was found to have only minimal impact on the differences computed between both methods tested. In fact, a slight tendency for these differences to progress as velocity increases was observed. The results of this study should be weighed in light of the decision to use an artificial nerve model. We acknowledge that the use of an actual median nerve is relevant, however the nervous tissue's characteristics *in situ* may be altered when exposed *ex vivo* such as in the present context. Studies have found that excised nerve show increased compliance due to reduce friction with perineural interface and loss of internal pressure (Millesi, Zoch et al. 1995, Walbeehm, Afoke et al. 2004). Future work could aim to define the effects of tensile loading on excursion and elongation within the nerve *ex vivo*, especially when different loading velocities are applied. Furthermore, the increasingly rapid pace of technology advancements over the past decade in ultrasound imaging system (e.g., spatial compounding) and transducer features (e.g., 3D transducers, high-frequency transducers), alongside the development of new image processing approaches (e.g., harmonic enhancement and adaptive tracking-software), also need consideration. These advancements could strengthen the reliability and validity of QUI measures and lead to development of novel methods to quantify nerve excursion.

5.2.7. Conclusion

Very good association and agreement were confirmed for longitudinal nerve-phantom excursion measures obtained using quantitative ultrasound imaging and motion analysis methods. These results support the use of QUI as a relevant approach to assess the neuromechanics properties of peripheral nerves in future research protocols. Caution is however warranted if peripheral nerve excursions > 10 mm are encountered as QUI could underestimate the absolute amount of excursion.

5.2.8. Acknowledgement

The authors would like to thank Daniel Marineau for his technical assistance during the study. The authors also wish to thank Prof. Andrew J Dilley, University College of London, for agreeing to share the frame-by-frame image analysis programme adapted for the present study.

Declaration of conflict of interest

The author(s) declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The author(s) disclosed receipt of the following financial support for the research, authorship, and/or publication of this article: Dany H Gagnon co-chairs the Initiative for the Development of New Technologies and Practices in Rehabilitation (INSPIRE) funded by the LRH Foundation. This study was funded via a partnership between the “Ordre professionnel de la Physiothérapie du Québec” and the Quebec Rehabilitation Research Network (REPAR).

5.2.9. References

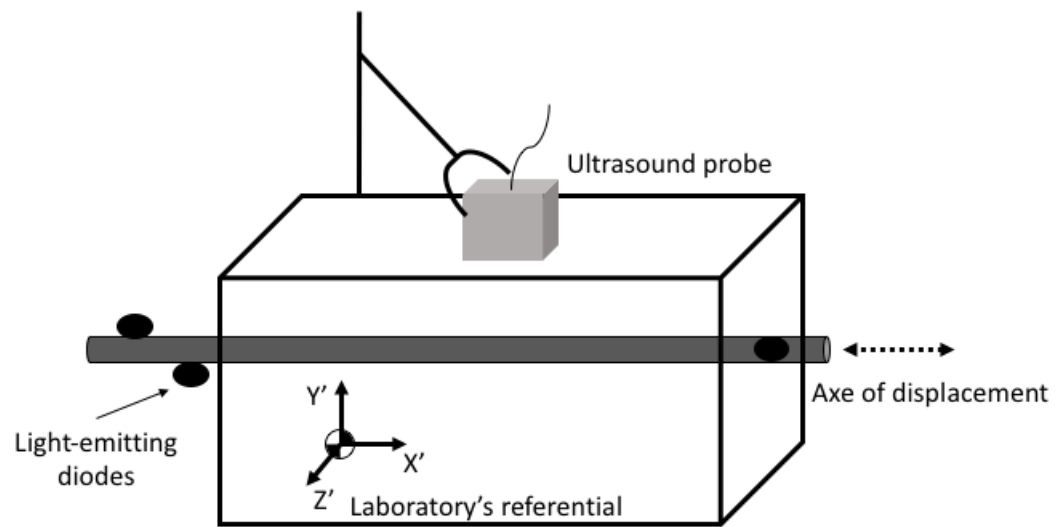
- Altman, D. G. (1991). Practical statistics for medical research. London, UK, Chapman & Hall/CRC.
- Bialosky, J. E., M. D. Bishop, D. D. Price, M. E. Robinson, K. R. Vincent and S. Z. George (2009). "A randomized sham-controlled trial of a neurodynamic technique in the treatment of carpal tunnel syndrome." J Orthop Sports Phys Ther **39**(10): 709-723.
- Bland, J. and D. Altman (1986). "Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement." Lancet **1**: 307-310.
- Bude, R. O. and R. S. Adler (1995). "An easily made, low-cost, tissue-like ultrasound phantom material." J Clin Ultrasound **23**(4): 271-273.
- Butler, D. (2000). The sensitive nervous system. Adelaide, Australia, Noigroup Publications.
- Coppieters, M. and D. Butler (2008). "Do 'sliders' slide and 'tensioners' tension? An analysis of neurodynamic techniques and considerations regarding their application." Manual Therapy **13**(3): 213-221.
- Coppieters, M. W., A. D. Hough and A. Dilley (2009). "Different nerve-gliding exercises induce different magnitudes of median nerve longitudinal excursion: an in vivo study using dynamic ultrasound imaging." J Orthop Sports Phys Ther **39**(3): 164-171.
- Desmeules, F., L. Minville, B. Riederer, C. H. Cote and P. Fremont (2004). "Acromio-humeral distance variation measured by ultrasonography and its association with the outcome of rehabilitation for shoulder impingement syndrome." Clin J Sport Med **14**(4): 197-205.
- Dilley, A., J. Greening, B. Lynn, R. Leary and V. Morris (2001). "The use of cross-correlation analysis between high-frequency ultrasound images to measure longitudinal median nerve movement." Ultrasound in medicine & biology **27**(9): 1211-1218.
- Dilley, A., B. Lynn, J. Greening and N. DeLeon (2003). "Quantitative in vivo studies of median nerve sliding in response to wrist, elbow, shoulder and neck movements." Clinical Biomechanics **18**(10): 899-907.
- Dilley, A., S. Odeyinde, J. Greening and B. Lynn (2008). "Longitudinal sliding of the median nerve in patients with non-specific arm pain." Manual therapy **13**(6): 536-543.
- Echigo, A., M. Aoki, S. Ishiai, M. Yamaguchi, M. Nakamura and Y. Sawada (2008). "The excursion of the median nerve during nerve gliding exercise: an observation with high-resolution ultrasonography." Journal of Hand Therapy **21**(3): 221-227.
- Ellis, R., W. Hing, A. Dilley and P. McNair (2008). "Reliability of measuring sciatic and tibial nerve movement with diagnostic ultrasound during a neural mobilisation technique." Ultrasound in medicine & biology **34**(8): 1209-1216.
- Ellis, R. F. and W. A. Hing (2008). "Neural mobilization: a systematic review of randomized controlled trials with an analysis of therapeutic efficacy." J Man Manip Ther **16**(1): 8-22.
- Erel, E., A. Dilley, J. Greening, V. Morris, B. Cohen and B. Lynn (2003). "Longitudinal sliding of the median nerve in patients with carpal tunnel syndrome." J Hand Surg Br **28**(5): 439-443.

- Ettema, A. M., C. Zhao, P. C. Amadio, M. M. O'Byrne and K. N. An (2007). "Gliding characteristics of flexor tendon and tenosynovium in carpal tunnel syndrome: a pilot study." Clin Anat **20**(3): 292-299.
- Filius, A., M. Scheltens, H. G. Bosch, P. A. van Doorn, H. J. Stam, S. E. R. Hovius, P. C. Amadio and R. W. Selles (2015). "Multidimensional ultrasound imaging of the wrist: Changes of shape and displacement of the median nerve and tendons in carpal tunnel syndrome." Journal of Orthopaedic Research **33**(9): 1332-1340.
- Greening, J., A. Dilley and B. Lynn (2005). "In vivo study of nerve movement and mechanosensitivity of the median nerve in whiplash and non-specific arm pain patients." Pain **115**(3): 248-253.
- Heebner, M. L. and T. S. Roddey (2008). "The effects of neural mobilization in addition to standard care in persons with carpal tunnel syndrome from a community hospital." Journal of Hand Therapy **21**(3): 229-240.
- Hough, A. D., A. P. Moore and M. P. Jones (2000). "Measuring longitudinal nerve motion using ultrasonography." Man Ther **5**(3): 173-180.
- Hough, A. D., A. P. Moore and M. P. Jones (2007). "Reduced longitudinal excursion of the median nerve in carpal tunnel syndrome." Archives of Physical Medicine & Rehabilitation **88**(5): 569-576.
- Ibrahim, I., W. S. Khan, N. Goddard and P. Smitham (2012). "Carpal tunnel syndrome: a review of the recent literature." Open Orthop J **6**: 69-76.
- Millesi, H., G. Zoch and R. Reihsner (1995). "Mechanical properties of peripheral nerves." Clin Orthop Relat Res(314): 76-83.
- Paquette, P., M. Lamontagne, J. Higgins and D. H. Gagnon (2015). "Repeatability and Minimal Detectable Change in Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging." Ultrasound in Medicine & Biology **41**(7): 2082-2086.
- Pinar, L., A. Enhos, S. Ada and N. Güngör (2005). "Can we use nerve gliding exercises in women with carpal tunnel syndrome?" Advances in therapy **22**(5): 467-475.
- Rozmaryn, L. M., S. Dovel, E. R. Rothman, K. Gorman, K. M. Olvey and J. J. Bartko (1998). "Nerve and tendon gliding exercises and the conservative management of carpal tunnel syndrome." J Hand Ther **11**(3): 171-179.
- Walbeehm, E. T., A. Afoke, T. de Wit, F. Holman, S. E. Hovius and R. A. Brown (2004). "Mechanical functioning of peripheral nerves: linkage with the "mushrooming" effect." Cell Tissue Res **316**(1): 115-121.
- Walsh, M. T. (2005). "Upper limb neural tension testing and mobilization. Fact, fiction, and a practical approach." J Hand Ther **18**(2): 241-258.
- Whittaker, J. L. and M. Stokes (2011). "Ultrasound imaging and muscle function." J Orthop Sports Phys Ther **41**(8): 572-580

Figure legends

- Figure 20. This figure shows a schematic of the experimental setup with the ultrasound probe supported over the nerve-phantom model. The nerve-phantom model was aligned with the X' axis of the calibrated 3D orthogonal coordinate system of the laboratory and the quantitative ultrasound system. The nerve-phantom was manually moved predominantly alongside the X' axis.
- Figure 21. This figure shows an ultrasound image acquisition of the nerve-phantom model. Note the clear upper and lower margins of the rod (white arrows) approximating the hyperechoic appearance of the epineurium of a peripheral nerve and the internal constitution composed of organised grey shade variation cause by small crack formation within the polymer's matrix.
- Figure 22. Scatterplot diagram showing correlation between longitudinal nerve-phantom excursions measured by ultrasound and motion analysis system (Fig. 22a), a Bland-Altman plot with 95% agreement limits (Fig. 22b) and a scatter plot showing correlation between the nerve excursion differences between the two methods (quantitative ultrasound imaging (QUI) method – motion analysis method) and velocity of the glides (Fig. 22c).

Figure 20.



Nerve-Phantom model

Figure 21.

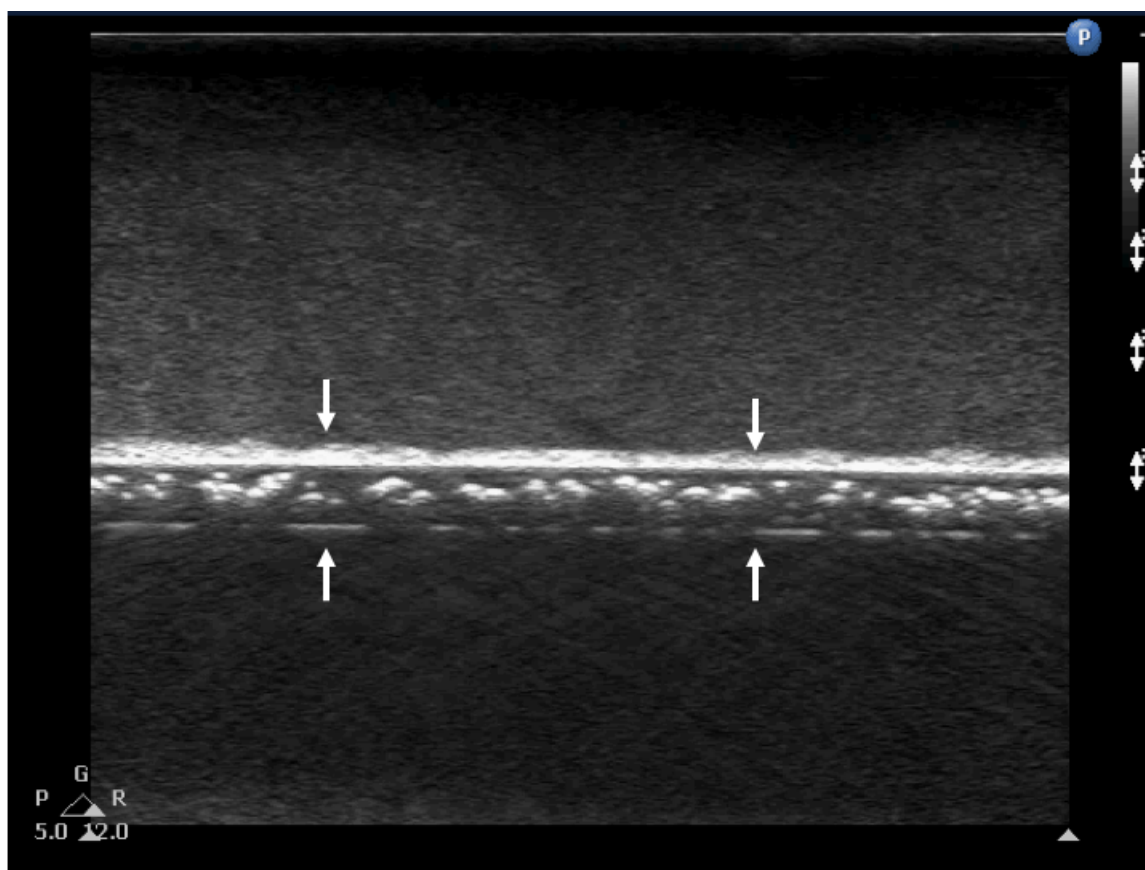
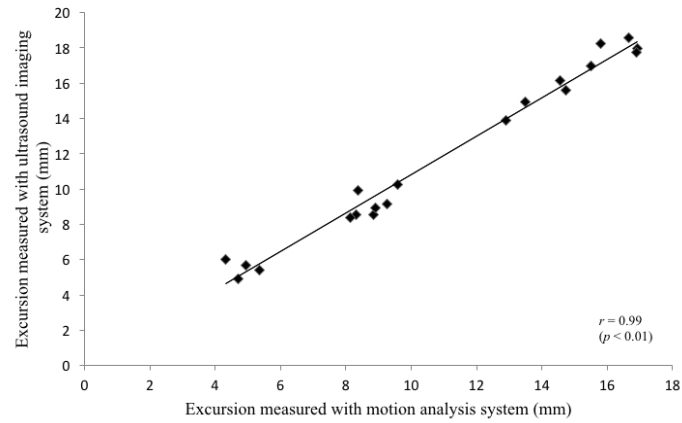
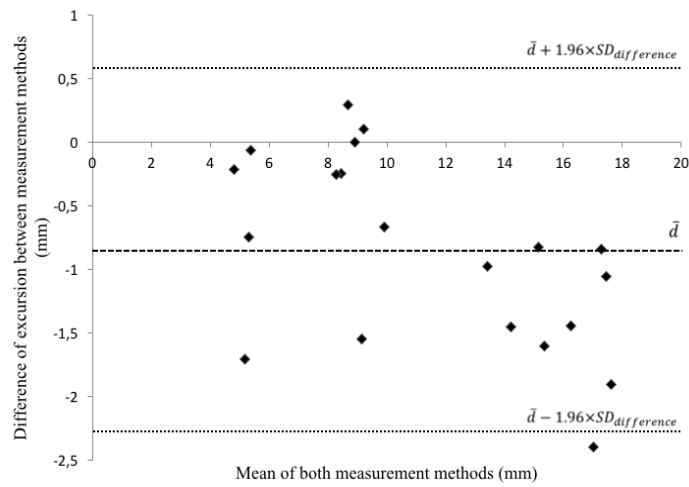


Figure 22.

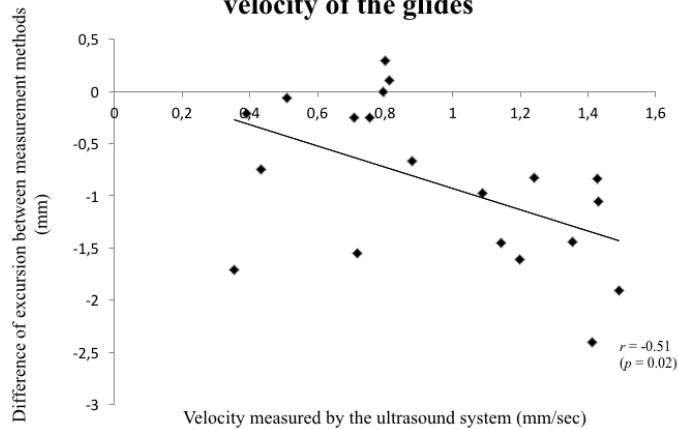
a. Correlation between measurement methods



b. Bland & Altman plot



c. Correlation between nerve excursion differences between the two methods and the velocity of the glides



5.3. Article n°3: Peripheral and central adaptations following a median nerve neuromobilization program completed by individuals with carpal tunnel syndrome: An exploratory mechanistic study using musculoskeletal ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation

Philippe Paquette, PT, PhD (candidate)^{1,2}, Johanne Higgins, OT, PhD^{1,2} Dany H. Gagnon, PT, PhD^{1,2}

¹Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal (CRIR) - Institut universitaire sur la réadaptation en déficience physique de Montréal (IURDPM) of the Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Ile-de-Montréal, Montreal, QC, Canada

²School of Rehabilitation, Faculty of Medicine, Université de Montréal, Montreal, QC, Canada

Article accepté pour publication dans la revue *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics* en octobre 2019.

À titre d'auteur principal, j'ai contribué significativement et majoritairement à l'élaboration du protocole expérimental et de la méthodologie, ainsi qu'à la collecte de données, l'analyse et l'interprétation des résultats. Mes directeurs de recherche ont également contribué au développement du protocole expérimental, de la méthodologie et ont encadré la rédaction du manuscrit. Prof. Higgins a contribué aux collectes de données impliquant la stimulation magnétique transcrânienne. Tous les auteurs ont contribué à la révision du contenu intellectuel du manuscrit et ont approuvé la version finale.

5.3.1. Avant-propos

Les physiothérapeutes recommandent fréquemment les exercices neurodynamiques afin d'améliorer les douleurs et la capacité fonctionnelle du membre supérieur des individus qui les consultent en lien avec un STC. Il est avancé que les exercices neurodynamiques ont des effets favorables sur l'intégrité biologique et les propriétés biomécaniques du nerf médian. D'autre part, il est connu que les exercices neurodynamiques ont également des effets neurophysiologiques. Afin de vérifier les mécanismes qui sous-tendent l'efficacité des exercices neurodynamiques, nous avons entrepris une étude longitudinale (devis pré-, post-intervention) où des individus atteints du STC ont complété un programme fondé sur les exercices neurodynamiques et s'inscrit dans le deuxième volet de cette thèse. L'aspect novateur de cette étude réside dans notre approche évaluative qui intègre l'imagerie quantitative par ultrasonographie et la stimulation magnétique transcrânienne afin d'objectiver les effets du programme sur les adaptations périphériques et centrales, respectivement. Avec l'expérience acquise durant la première étude portant sur la fidélité des mesures d'excursion du nerf médian, quelques changements ont été apportés au protocole, notamment le retrait de la composante de mouvement actif d'inclinaison latérale cervicale qui pouvait s'avérer difficile ou inconfortable pour certains participants. De plus, seule la position d'évaluation avec 45° d'abduction de l'épaule fut retenue. Les manœuvres de tension et de glissement ont été évaluées, alors qu'une manœuvre n'incluant que l'extension du poignet fut ajoutée à des fins comparatives.

5.3.2. Abstract

Objective: Neuromobilization exercises are increasingly advocated in the conservative management of individuals with carpal tunnel syndrome (CTS) as they may mitigate CTS-related signs and symptoms via potential peripheral (i.e. musculoskeletal) and central (i.e. neurophysiological) adaptations. However, the mechanisms underlying these adaptations have not been studied extensively. Hence, this exploratory and mechanistic study aims to evaluate the potential peripheral and central adaptations that may result in individuals with CTS who have completed a neuromobilization program.

Method: Fourteen individuals with CTS were evaluated prior to and one week following the completion of a four-week neuromobilization program which incorporated median nerve sliding exercises. Pain and upper limb functional abilities were assessed using standardized questionnaires. The biological integrity and mechanical properties of the median nerve as well as the corticospinal excitability were quantified using musculoskeletal ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation, respectively.

Results: Upon completion of the program, participants reported both large and moderate improvements in pain ($p \leq .03$) and upper limb functional abilities ($p = .02$), respectively. The biological integrity and mechanical properties of the median nerve remained unchanged ($p \geq .22$) whereas a small significant increase in corticospinal excitability ($p = .04$) was observed.

Conclusion: The proposed neuromobilization program appears promising to improve pain and upper limb functional abilities in individuals with CTS. These improvements may be preferentially mediated via central, rather than peripheral adaptations. Future studies, especially with a larger sample size, longer intervention duration, and additional measurement times, are needed to strengthen current evidence.

Key words : Carpal tunnel syndrome, Musculoskeletal pain, Nerve gliding exercises, Ultrasound imaging, Transcranial magnetic stimulation

5.3.3. Introduction

Carpal tunnel syndrome (CTS), a complex condition affecting the median nerve, is the most common entrapment neuropathy encountered in industrialized countries such as the Netherlands, Sweden, the United States and the United Kingdom (Atroshi, Gummesson *et al.*, 1999; de Krom, Knipschild *et al.*, 1992; Ferry, Pritchard *et al.*, 1998; Tanaka, Wild *et al.*, 1994). In these countries, the prevalence rates are estimated to range between 3.8% and 16% among the general population (Atroshi *et al.*, 1999; de Krom *et al.*, 1992; Ferry *et al.*, 1998; Tanaka *et al.*, 1994). Individuals with CTS typically experience sensorimotor impairments, such as pain and paresthesias in the thumb, index finger, middle finger, and radial side of the ring finger (i.e. sensory territory of the median nerve). Some individuals with CTS also report a decreased pinch or grip strength, which can be associated with atrophy of the abductor pollicis brevis and opponens pollicis muscles. All these sensorimotor impairments may prompt a progressive loss of wrist and hand function altering everyday activities, such as difficulties while writing, typing, or drawing. Hence, conservative treatments are recommended for individuals with mild to moderate symptoms of CTS, whereas surgical treatment is reserved for those with persistent or severe symptoms (American Academy of Orthopaedic Surgeons Work Group Panel, 2016). However, a variety of conservative treatment options are available (e.g. wrist orthoses, ergonomic modifications, manual therapy, nonsteroidal anti-inflammatory medications, or steroid injections). Thus, selecting the best option for each individual with CTS may prove challenging (Shi, Bobos *et al.*, 2018).

Neuromobilization exercises are frequently advocated by rehabilitation professionals to improve sensorimotor impairments and functional abilities in chronic musculoskeletal conditions, although further investigation is needed to support their effectiveness among individuals with CTS (Basson, Olivier *et al.*, 2017). Neuromobilization exercises incorporate a broad spectrum of techniques aiming to mobilize peripheral nerves and their surrounding structures via single- or multi-joint movement(s) (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, & George, 2009; Coppieters & Butler, 2008; Nee & Butler, 2006). When joints are moved, the direction and the magnitude of the movements inherently induce tensile stresses along a nerve segment that translate into varying levels of nerve elongation and excursion (Topp & Boyd, 2006). There are two main categories of neuromobilization techniques: “*tensioners*” and “*sliders*”, based on

their capability to elicit nerve elongation or excursion, respectively (Coppieters, Hough, & Dilley, 2009). *Tensioners* promote a nerve elongation, whereas *sliders* promote an excursion, and thus expose the nerve to less strain (i.e. considered less aggressive), which may be more suited for individuals with CTS (Coppieters, Hough, & Dilley, 2009; Nee & Butler, 2006). To evaluate the effectiveness of neuromobilization, previous studies have primarily used self-reported pain measures, and only a few studies have highlighted clinical effects such as increased fluid dispersion, reduced intraneural edema, improved median nerve distal motor latency and normalized thermal hyperalgesia (Basson *et al.*, 2017; Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent *et al.*, 2009; Boudier-Reveret, Gilbert *et al.*, 2017; Oskouei, Talebi *et al.*, 2014; Schmid, Elliott *et al.*, 2012). This evidence suggests that both peripheral and central adaptations may result from neuromobilization exercises. Today, these effects can be characterized using musculoskeletal ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation, respectively.

Musculoskeletal ultrasound imaging is increasingly used to characterize median nerve impairments at the wrists among individuals with CTS (Sucher & Schreiber, 2014). In CTS, the biological integrity of the median nerve is altered due to a complex cascade of pathophysiological processes, initially involving impaired blood flow and ischemia, then blood-nerve barrier breakdown, and eventually, the formation of intraneural edema (Ibrahim, Khan *et al.*, 2012). This complex cascade may convert into distinctive features on ultrasound images of the median nerve, such as an enlargement or swelling of the nerve, a hypoechoic (i.e., darker) appearance, and the loss of the distinctive honeycombing pattern of the nerve at or proximal to the compression site (Impink, Gagnon *et al.*, 2010; Sucher & Schreiber, 2014). In addition, free excursion of the median nerve is required to accommodate joints motions during daily activities and minimize the risk of median nerve damage. In fact, a recent systematic review suggests that a restricted median nerve longitudinal excursion is a determinant of CTS (Ellis, Blyth *et al.*, 2017).

Transcranial magnetic stimulation is regularly used to characterize changes involving the central nervous system by measuring both corticospinal and intracortical excitabilities (Rossini, Burke *et al.*, 2015). Corticospinal excitability modulations are associated with hand function and pain intensity in individuals with various chronic wrist and hand conditions,

including individuals with CTS (René Pelletier, Higgins, & Bourbonnais, 2017; Schwenkreis, Scherens *et al.*, 2010). Transcranial magnetic stimulation has been used to examine the cortical excitability of individual with lower back pain, and offer an alternative method to examine the modulation of corticospinal excitability in individuals with CTS (Parker, Lewis *et al.*, 2016).

Characterizing these effects is crucial to gain a better understanding of the multidimensional mechanistic effects of neuromobilization exercises. The aim of the present study is to gain a better understanding of the potential immediate peripheral and central adaptations that may be observed following a home-based neuromobilization program incorporating sliding exercises completed by individuals with CTS. To do so, peripheral and central adaptations will be characterized using ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation, respectively. It is hypothesized that individuals with CTS will report improvements in pain and upper limb function following completion of the neuromobilization program, and that changes in median nerve integrity (i.e. decreased size, increased echogenicity, smoother texture), and mechanical properties (i.e. increased longitudinal nerve excursion), as well as increased corticospinal excitability will be observed.

5.3.4. Materials and Methods

5.3.4.1. Participants

Using the registry of a local physiotherapy clinic, invitation letters were sent to potential participants who had consulted for CTS or other wrist-related conditions over the past two years. Potential participants were included if they had: a) electrodiagnostic findings consistent with median mononeuropathy; b) symptoms for at least three months; and c) at least two clinical signs consistent with CTS (see table 1). Potential participants were excluded if they: a) had previous surgery to the evaluated hand or wrist; b) had comorbidities associated with CTS including rheumatoid arthritis, diabetes and hypothyroidism; c) had impaired upper limb range of motion (e.g. shoulder abduction $< 90^\circ$) or any other condition limiting the completion of the exercise program; d) had contra-indication to transcranial magnetic stimulation (e.g. metal implants, pacemaker, familial and personal history of seizures, usage of anti-epileptic drugs) or e) were pregnant. Prior to being evaluated at the Pathokinesiology Laboratory, eligible

participants signed an informed consent form, approved by the research ethics committee of the Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal [CRIR 1073-0414].

5.3.4.2. Assessments and outcome measures

Participants' sociodemographic and history information (including prior treatments received for CTS) as well as relevant anthropometric measurements were obtained upon entering the study. Clinical and laboratory assessments were completed prior to the initiation of the home-based exercise program (T0), and within one week following completion of the program (T1). The clinical assessment included a standardized physical examination and questionnaires. Laboratory assessment included ultrasound imaging and transcranial magnetic stimulation measures.

Upper limb function and pain evaluation

The West Haven-Yale Multidimensional Pain inventory (WHYMPI) was used to evaluate different pain-related disabilities and cognitive-behavioral factors involved in the experience of pain (Kerns, Turk, & Rudy, 1985). The WHYMPI includes 52 items encompassing several domains related to pain experience (five domains). Scoring ranges from 0 (e.g. no pain, no interference, not at all severe) to 6 (very intense pain, extreme interference, extremely severe), where a higher mean score (range 0-6) represents higher impairment. The Disability of the Arm, Shoulder, and Hand (DASH) scale was used to evaluate the impact of the CTS on upper limb functional abilities. The DASH includes 30 questions covering participation and performance of daily activities with the upper limb, as well as symptom severity. Scoring ranges from 1 (e.g. no difficulty, not limited, strongly disagree) to 5 (e.g. unable, extremely limited, strongly agree), where a higher weighted score (range 0-100) represents substantial disability (Hudak, Amadio, & Bombardier, 1996). Both scales have good psychometric properties (WHYMPI: repeatability ICC ≥ 0.75 ; DASH: repeatability ICC = 0.91) when tested in adults with chronic musculoskeletal pain, and have an adapted and validated French version (Bergström, Jensen *et al.*, 1999; Durand, Vachon *et al.*, 2005; Kerns, Turk, & Rudy, 1985; Laliberté, Lamoureux *et al.*, 2008). Additionally, the relative minimal detectable change (MDC) was previously estimated for the DASH ($MDC_{90\%} = 10.7$) (Beaton, Katz *et al.*, 2001). For the WHYMPI, the MDC was estimated for each of the five pain experience domains based on

published reliability data and ranges from 15.43% (pain interference) to 29.47% (affective distress) (Haley & Fragala Pinkham, 2006; Kerns, Turk, & Rudy, 1985).

Musculoskeletal ultrasound imaging evaluation and analysis

The median nerve biological integrity and mechanical properties were assessed using a linear transducer (12-5 MHz, 55 mm footprint) connected to a Philips HD11 XE ultrasound system (Philips Medical Systems, Bothell, WA) by the first author. The ultrasound parameters (i.e., 3 cm depth, 80 gain, focus zone adjusted to the median nerve) were kept constant across all participants. Participants were positioned in a supine position on an adapted examination table, with the head resting on a pivoting support in the horizontal plane equipped with adjustable stabilizers limiting scapula elevation, and arms placed at a 45° abduction with elbow extended and forearm supinated. Three static images of the median nerve were acquired in the transverse and longitudinal planes at the carpal tunnel inlet. Thereafter, three 10-second videos were acquired in the longitudinal plane 5 cm proximal to the wrist crease, while three different mobilizations were passively performed to elicit nerve excursion: A) isolated wrist extension, B) wrist extension combined with 30° ipsilateral neck side flexion and C) wrist extension combined with 30° contralateral neck side flexion. The decision to acquire videos at the distal forearm was informed by previous research investigating longitudinal median nerve excursion in response to wrist extension (Andrew Dilley, Lynn *et al.*, 2003; Paquette, Lamontagne *et al.*, 2015). Images and videos were exported to a desktop computer. The static images were analyzed using custom software developed in the MATLAB environment (Image Processing Toolbox, The MathWorks, Natick, MA). Briefly, this software provides an interface allowing one to calibrate, magnify, and manually trace regions of interest (ROI) for each static image. ROIs were defined by tracing the inner contour of the perineurium of the nerve. From these ROIs, the median nerve's biological integrity outcomes (i.e. geometry, grayscale distribution, and texture-related measures), as previously described, were extracted (Collinger, Fullerton *et al.*, 2010; Impink *et al.*, 2010; Nadeau, Desrochers *et al.*, 2016). Moderate to good reliability ($0.58 < \phi < 0.99$) and good accuracy ($SEM \leq 13\%$) have been reported for the geometrical and grayscale distribution and texture measures of the median nerve, respectively (Impink *et al.*, 2010). From the videos, the median nerve's mechanical properties were analyzed using a computerized frame-by-frame decisional algorithm that quantified the amplitude and direction of longitudinal

nerve excursions (A. Dilley, Greening *et al.*, 2001). Moderate to good reliability ($0.58 < \phi < 0.84$) and fair to good accuracy ($SEM = 26.4\% - 15.6\%$) have been previously reported when tensioning and sliding neuromobilization technique are performed with 45° of shoulder abduction, respectively (Paquette *et al.*, 2015).

Transcranial magnetic stimulation evaluation and analysis

A single investigator (P.P.) performed transcranial magnetic stimulation assessments. Participants were seated in a chair with their forearms resting on a pillow. After careful skin preparation, surface electrodes were applied over the *abductor pollicis brevis* muscle, with the reference electrode on the first metacarpophalangeal joint. Maximum compound muscle action potentials (Mmax) were elicited using a bipolar electrode connected to a current stimulator (Digitimer DS7A, UK). Transcranial magnetic stimulation was delivered using a magnetic stimulator (Magstim BiStim², Whitland, Wales, UK) connected to a figure-of-eight coil (lateral wing diameter 70 mm). The coil was oriented approximately 45° to the central sulcus, with the tail pointed dorsally. The “hotspot” was identified as the area where a motor evoked potential (MEP) could be elicited with minimal stimulation intensity, and the location was marked using the neuro-navigation system, Brainsight (Rogue Research Inc., Montréal, QC). The resting motor threshold (rMT) was subsequently defined by the minimum stimulator intensity required to elicit MEPs amplitude $> 50 \mu V$ in 5 out of 10 trials (Rossini *et al.*, 2015). Recruitment curves were assessed using ten MEP delivered randomly at 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, or 160% of the rMT. A single investigator (P.P.) analyzed off-line the EMG signals recorded. Pre-processing of raw signals was conducted to detect stimulation artifacts using custom software developed in LabVIEW (National Instruments Corporation, US) (O’Keeffe, Lyons *et al.*, 2001). Signals were amplified (x1000) and sampled at 1-1000 Hz, and then a Butterworth filter set at 20 Hz was applied. Peak-to-peak MEP amplitudes were measured for each of the ten trials. The median of ten MEPs for each stimulation intensity (i.e. 90% to 160%) were normalized as a ratio of the Mmax to account for potential focal median nerve conduction block due to CTS (Schabrun, Ridding *et al.*, 2012). Recruitment curves were drawn using the average of the MEP/Mmax amplitudes across participants plotted against each intensity. The data was fitted with a sigmoidal function ($R^2 > 0.983$), using the MATLAB *sigm_fit* function (see Equation 2), where X_{50} is the coordinate on the X-axis associated to $\frac{1}{2} Y_{max}$:

$$(x) = Min + \frac{(Max-Min)}{1+10 ((X_{50}-X) * slope)} \quad (\text{equation 5.3.1})$$

The slope was estimated using linear regression of the steepest part of the recruitment curve (i.e., 120% to 140%). Good repeatability (ICC = 0.75) has previously been reported when using this method, although the accuracy was not reported (Malcolm, Triggs *et al.*, 2006). The MDC was estimated based on previously published data (Malcolm *et al.*, 2006). Thus, a positive or negative change in the slope greater than 32.82% exceeded the measurement error and was considered true change.

5.3.4.3. Intervention

Participants completed a four-week home-based neuromobilization program encompassing sliding exercises, developed according to the work of Butler et al. (Butler, 2000). The program was further validated by consensus during an iterative two-round process, involving the research team members and two additional expert physiotherapists with extensive experience with both performing and prescribing neuromobilization exercises. The program included isolated and coupled upper limb and neck movements. A specific neuromobilization exercise was elaborated for each week of the program, allowing for a gradual increase in the range of movement and inter-joint coordination (see Figure 23). Participants were instructed to perform three series of 15 repetitions of each recommended neuromobilization exercise daily. Participants were encouraged to perform their exercises in the morning, noon, and evening. Participants were further instructed to expect “deep tension” or “pulling” sensations during the movements, and that while mild pain and paresthesia could occur, they were not expected to last after completion of the exercises. Alongside the exercises, a weekly video-conference with each participant was organized by the first author to provide personalized feedback and optimize exercise progression. In addition, participants were asked to keep a logbook to document exercise performance and compliance.

5.3.4.4. Statistical analysis

Descriptive statistics were calculated for all participants’ characteristics and outcome measures. The symptomatic side, or most symptomatic side when a bilateral CTS was diagnosed, was retained for analysis, and the asymptomatic or least symptomatic side could not

serve as a control since both wrists are unlikely to be independent (Keith, Masear *et al.*, 2010). The sample size was selected based on prior studies reporting data for longitudinal excursion measurements (Coppieters *et al.* 2009 (Coppieters, Hough, & Dilley, 2009), N=15) and transcranial magnetic stimulation-related measurements (Masse-Alarie *et al.* 2013 (Massé Alarie, Flamand *et al.*, 2013), N=13). A convenience sample was used since no prior study had provided data for both peripheral and central measurement following neurodynamic exercises. The statistical analyses used were chosen based on the relatively small sample size and the observation that some outcomes (i.e. grayscale and texture measures, and corticospinal excitability) were not normally distributed, as assessed by the Shapiro–Wilk test. Wilcoxon signed rank tests were used to verify if the intervention had a significant effect (i.e. T0 vs. T1 measures) on pain, upper-limb function, median nerve integrity, mechanical properties, and corticospinal excitability. Effect sizes values (r) were also estimated by dividing the z-statistic by the square root of the number of observations and interpreted as follows: ≥ 0.1 = small, ≥ 0.3 = moderate, and ≥ 0.5 = large effects (Cohen, 1988; Pallant, 2007). A p value of $< .05$ was considered statistically significant. Statistical analyzes were performed using IBM SPSS (v25).

5.3.5. Results

A convenience sample of N=14 participants completed the neuromobilization program. The baseline characteristics of participants are presented in Table IX. As reported in the logbooks, half (50%) of the participants complied perfectly with the suggested program parameters (i.e. 45 daily repetitions) whereas 29% and 21% performed additional (i.e. 50 to 60) and fewer (i.e. 40) daily repetitions, respectively. Boxplot diagrams of pain and upper limb functional abilities measures are presented in Figure 24. Overall, participants reported moderate to large statistically significant improvement in the pain interference and support domain subscores of the WHYPMI scale, following completion of the neuromobilization program ($r = 0.56$; $p < .01$ and $r = 0.40$; $p = .03$, respectively). More specifically, for the pain interference domain, 13 out of 14 participants reported a decrease in relative pain interference, ranging between 2.5% to 38.7%. Among these 13 participants, six reached relative changes exceeding MDC ($MDC_{90\%} \geq 15.43\%$). Only one participant reported a relative increase in pain interference by 4.5%. For the support domain, 8 out of 14 participants reported relative improvement in support, ranging between 8.3% and 75%. Among these 8 participants, four

reached relative changes exceeding MDC ($MDC_{90\%} \geq 23.83\%$). Five participants did not report any change, while one participant reported a relative worsening in the support domain by 8.3%. As for upper limb functional abilities measures, participants reported a moderate statistically significant relative improvement on the DASH scale following completion of the neuromobilization program ($r = 0.46$; $p = .02$;) on the DASH scale. Specifically, 11 out of 14 participants reported relative improvements ranging from 1.1% to 29.2%. Among these 11 participants, six reached relative changes exceeding the MDC ($MDC_{90\%} \geq 10.7\%$). One participant did not report any change, whereas two participants reported a relative worsening by 0.8% and 14.2%, respectively.

Median nerve biological integrity and mechanical properties measures, as well as cortical excitability measures are presented in Table X. Geometry, and grayscale and texture measures did not change significantly following completion of the neuromobilization program ($p > .18$), although some grayscale and texture-related measures showed a small effect size. Longitudinal excursions measures of the three mobilizations did not change significantly ($p > .22$) although a small effect size was found when only extending the wrist. The median MEP amplitudes did not change significantly following completion of the neuromobilization program ($p = .53$). For the recruitment curves, a moderate significant increase in MEP amplitude was observed at 160% of the rMT ($r = 0.39$; $p = .04$), whereas changes at other intensities were not statistically significant ($p > .30$) following completion of the neuromobilization program. Graphical presentation of the recruitment curves highlights a mean absolute rise in the recruitment curve slope ($slope_{T0} = 6.58$; $slope_{T1} = 9.43$; relative change = +35.58%), which exceeds the measurement error ($MDC_{90\%} = 33.82\%$) (see Figure 25a). The variations in MEP amplitudes from the recruitment curves were further illustrated by plotting the inter-individual differences of median MEP amplitudes following completion of the NGEP (see Figure 25b).

5.3.6. Discussion

5.3.6.1. Neuromobilization exercises alleviate pain and optimize upper limb functional abilities

Our results confirm the hypothesis that individuals with CTS will report improvements in pain and upper limb disabilities, following completion of the proposed neuromobilization

program. Specifically, 6 participants (1, 2, 3, 6, 9, 12) reported significant and important improvement in the pain interference domains of the WHYMPI, while 6 participants (1 to 6) reported significant and important improvement in upper limb functional abilities, following completion of the program. These results are in line with a previous study reporting that six sessions of neuromobilizations, based on sliding exercises, improved upper limb functional ability among participants with CTS by 4.9% on the DASH scale (compared to 8.5% averaged improvement in this study) (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent, *et al.*, 2009). Overall, these results validate our rationale to further investigate the underlying effects of our neuromobilization program on peripheral and central adaptations.

5.3.6.2. Neuromobilization exercises may alter median nerve integrity and longitudinal excursion

Our results do not confirm the hypothesis that median nerve integrity and mechanical properties are significantly and meaningfully improved following completion of the neuromobilization program. The absence of adaptation for the geometry measures, coupled with the potential adaptations for the grayscale and texture measures, indicates that our intervention had limited effects on the median nerve's integrity. Likewise, our intervention also had limited effects on longitudinal nerve excursion. Our results suggest that neuromobilization exercises induce transient biomechanical effect, which may not translate into lasting changes (e.g. increased longitudinal excursion). To our knowledge, this is the first study to report the isolated effect of neuromobilization exercise on the median nerve's integrity. For comparison, prior studies investigating the effects of neuromobilization exercises also included the use of wrist splints, which is a potential confounding variable (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, Vincent, *et al.*, 2009; Pinar, Enhos *et al.*, 2005; Schmid *et al.*, 2012). Although we did not measure longitudinal excursion directly within the carpal tunnel, previous research suggests that the values of median nerve excursion measured at the forearm likely represent values found in adjacent nerve segments (i.e. carpal tunnel) when the wrist is extended (Andrew Dilley *et al.*, 2003; Erel, Dilley *et al.*, 2003). Future studies should aim to verify if different types of neuromobilization (e.g. tensioners) could induce changes in the median's nerve integrity or mechanical properties.

5.3.6.3. Neuromobilization exercises modifies corticospinal excitability

Our results confirm the hypothesis that corticospinal excitability increases following completion of the neuromobilization program. The increase in the recruitment curve slope indicates stronger intra-cortical and corticospinal connections, likely resulting from median nerve neuromobilization. Mechanical stimuli of the median nerve may share similarities with electrical stimulations of the peripheral nerve, which have been shown to induce motor cortex reorganization (Chipchase, Schabrun, & Hodges, 2011). Our program encompassed repetitions of movements involving progression in complexity and feedback, two elements associated with motor cortex changes (Boudreau, Farina, & Falla, 2010). Therefore, motor cortex reorganization is a plausible mechanism that can be triggered by neuromobilization of the median nerve. There is evidence that improvements in function linked to plastic changes of the motor cortex, including increased corticospinal excitability, occur following an upper-limb rehabilitation program among individuals who have sustained a stroke (Beaulieu & Milot, 2017). Those findings may generalize to some extent, into the CTS population.

5.3.6.4. Clinical significance

In their daily practice, most rehabilitation professionals focus on the biomechanical properties of neuromobilization exercises in their assessments and recommendations to their patients, following the assumption that they promote ‘healing’ of the median nerve at the wrist (i.e. peripheral effects). However, despite self-reported improvements in pain and upper limb functional abilities (with large and moderate effect sizes, respectively), our findings challenge this assumption to some extent since we did not observe significant peripheral adaptations of the structural integrity and mechanical properties (i.e. longitudinal excursion) of the median nerve following completion of the neuromobilization program. In contrast, central adaptations of the central nervous system in individuals with symptomatic CTS remain highly plausible in light of the present findings. Hence, these adaptations deserve additional attention, as they may be a strong predictor of clinical progression and should be reported as an outcome in research protocols and clinical practice whenever possible (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, & George, 2009). Unfortunately, neurophysiological measurements obtained by transcranial

magnetic stimulation are not readily available in the clinic. In this context, clinicians could consider using tests such as the two-point discrimination, which can serve as a proxy for somatosensory cortices plasticity (Pleger, Ragert *et al.*, 2006; Tecchio, Padua *et al.*, 2002). Specifically, identifying individuals with a deficit in two-point sensation should prompt clinicians to include interventions promoting corticospinal adaptations. Likewise, adopting a multimodal approach combining other interventions such as graded motor imagery, pain education, or cognitive-targeted interventions that have also been shown to produce central adaptations, could potentiate the efficacy of neuromobilization exercises in individuals with CTS (Nijs, Meeus *et al.*, 2014; R. Pelletier, Higgins, & Bourbonnais, 2015).

5.3.7. Limits

In this study, for pragmatic reasons, a home-based exercise program with weekly supervision was favored over sessions of neuromobilizations performed by rehabilitation professionals (e.g. a physiotherapist). In addition, different outcomes are to be expected in response to different types of neurodynamic techniques (i.e. *sliders* vs. *tensioners*). Thus, the present findings may not generalize to other types or delivery modes of neuromobilization exercises. Nonetheless, we consider that the proposed home-based program has qualities (e.g. safe, low cost, easy to teach) that make it readily applicable in the clinic and future studies investigating the efficacy of different types of neuromobilization exercises for CTS. Considering these program attributes, the duration of the program may also need to be extended to potentiate long-term musculoskeletal and central adaptations. Other limitations in this study are the relatively small sample size and the lack of multiple pre-intervention measures (i.e. self-controlled design), or of a distinct control group. In the context of this exploratory study, the small sample size confirms the relevance of the constructs investigated (i.e. the neuromobilization program appears to improve functional abilities and pain and, at least, promotes central adaptations), despite uncertainties remaining regarding the clinical importance of these effects. Moreover, it confirms the need for a large confirmatory study to strengthen the current evidence. For example, a further study could assess the recruitment curve, which includes eight different intensities (i.e. one factor repeated measures ANOVA). If using a basic rule of thumb of 10 participants per iteration, a sample size estimate of 80 participants would be required. Also, we acknowledge that the use of controls could have provided relevant insights

on factors such as patient expectancy and placebo effect, which have been shown to influence cortical plasticity (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, & George, 2009). Nonetheless, these limits do not alter our main findings that the proposed neuromobilization program has little effect on the median nerve biological integrity and mechanical properties, but modulates corticospinal excitability of individuals with CTS.

5.3.8. Conclusions

This exploratory mechanistic study indicates that a four-week neuromobilization program encompassing sliding exercises may reduce pain and improve upper limb functional abilities among individuals with CTS. These improvements may be preferentially mediated via an increase in corticospinal excitability, whereas little to no adaptations were observed in the median nerve's biological integrity and mechanical properties.

5.3.9. Funding Statement

A joint grant award program from the “Ordre professionnel de la Physiothérapie du Québec” and the Quebec Rehabilitation Research Network (REPAR) [#5047] supported this work. P.P. is supported by a doctoral scholarship from the Fonds de Recherche Québec - Santé (FRQS). D.G. co-chairs the Initiative for the Development of New Technologies and Practices in Rehabilitation (INSPIRE) funded by the LRH Foundation and co-led the Rehabilitation Interventions for Individuals with a SCI in the Community research team funded by the Ontario Neurotrauma Foundation and the Quebec Rehabilitation Research Network. The equipment and material required to complete this project were financed in part by the Canada Foundation for Innovation, the Institut *Robert-Sauvé en Santé et Sécurité au Travail* (IRSST) and the REA foundation.

5.3.10. Acknowledgments

The authors thank the contribution of M. Youssef El Khamlichi and M. Michel Goyette for their assistance with the EMG-analysis software and recruitment curve modeling. We also thank Mrs. Raymonde Fortin and Diane Racette for their expert feedback with the nerve-gliding

exercise program and Mrs. Ann-Julie Côté and Jasmine Arel for their assistance during experimental procedures.

5.3.11. References

- American Academy of Orthopaedic Surgeons Work Group Panel. (2016). Management of Carpal Tunnel Syndrome Evidence-Based Clinical Practice Guideline.
- Atroshi, I., Gummesson, C., Johnsson, R., Ornstein, E., Ranstam, J., & Rosen, I. (1999). Prevalence of carpal tunnel syndrome in a general population. *JAMA*, 282(2), 153-158.
- Basson, A., Olivier, B., Ellis, R., Coppieters, M., Stewart, A., & Mudzi, W. (2017). The Effectiveness of Neural Mobilization for Neuromusculoskeletal Conditions: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 47(9), 593-615.
- Beaton, D. E., Katz, J. N., Fossel, A. H., Wright, J. G., Tarasuk, V., & Bombardier, C. (2001). Measuring the whole or the parts? Validity, reliability, and responsiveness of the Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand outcome measure in different regions of the upper extremity. *Journal of Hand Therapy*, 14(2), 128-146.
- Beaulieu, L. D., & Milot, M. H. (2017). Changes in transcranial magnetic stimulation outcome measures in response to upper-limb physical training in stroke: A systematic review of randomized controlled trials. *Ann Phys Rehabil Med*.
- Bergström, K. G., Jensen, I. B., Linton, S. J., & Nygren. (1999). A psychometric evaluation of the Swedish version of the Multidimensional Pain Inventory (MPI-S): a gender differentiated evaluation. *European journal of pain (London, England)*, 3(3), 261-273.
- Bialosky, J., Bishop, M., Price, D., Robinson, M., & George, S. (2009). The mechanisms of manual therapy in the treatment of musculoskeletal pain: a comprehensive model. *Manual Therapy*, 14(5), 531-538.
- Bialosky, J., Bishop, M., Price, D., Robinson, M., Vincent, K., & George, S. (2009). A randomized sham-controlled trial of a neurodynamic technique in the treatment of carpal tunnel syndrome. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 39(10), 709-723.
- Boudier-Reveret, M., Gilbert, K. K., Allegue, D. R., Moussadyk, M., Brismee, J. M., Sizer, P. S., Jr., Feipel, V., et al. (2017). Effect of neurodynamic mobilization on fluid dispersion in median nerve at the level of the carpal tunnel: A cadaveric study. *Musculoskelet Sci Pract*, 31, 45-51.
- Boudreau, S., Farina, D., & Falla, D. (2010). The role of motor learning and neuroplasticity in designing rehabilitation approaches for musculoskeletal pain disorders. *Manual Therapy*, 15(5), 410-414.
- Butler, D. (2000). *The sensitive nervous system*. Adelaide, Australia: Noigroup Publications.
- Chipchase, L. S., Schabrun, S. M., & Hodges, P. W. (2011). Peripheral electrical stimulation to induce cortical plasticity: a systematic review of stimulus parameters. *Clin Neurophysiol*, 122(3), 456-463.

- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2 ed.). New York: Academic Press.
- Collinger, J., Fullerton, B., Impink, B., Koontz, A., & Boninger, M. (2010). Validation of grayscale-based quantitative ultrasound in manual wheelchair users: relationship to established clinical measures of shoulder pathology. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 89(5), 390-400.
- Coppieters, M., & Butler, D. (2008). Do 'sliders' slide and 'tensioners' tension? An analysis of neurodynamic techniques and considerations regarding their application. *Manual Therapy*, 13(3), 213-221.
- Coppieters, M., Hough, A., & Dilley, A. (2009). Different nerve-gliding exercises induce different magnitudes of median nerve longitudinal excursion: an in vivo study using dynamic ultrasound imaging. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 39(3), 164-171.
- de Krom, M. C., Knipschild, P. G., Kester, A. D., Thijs, C. T., Boekkooi, P. F., & Spaans, F. (1992). Carpal tunnel syndrome: prevalence in the general population. *J Clin Epidemiol*, 45(4), 373-376.
- Dilley, A., Greening, J., Lynn, B., Leary, R., & Morris, V. (2001). The use of cross-correlation analysis between high-frequency ultrasound images to measure longitudinal median nerve movement. *Ultrasound in medicine & biology*, 27(9), 1211-1218.
- Dilley, A., Lynn, B., Greening, J., & DeLeon, N. (2003). Quantitative in vivo studies of median nerve sliding in response to wrist, elbow, shoulder and neck movements. *Clinical Biomechanics*, 18(10), 899-907.
- Durand, M. J., Vachon, B., Hong, Q. N., & Loisel, P. (2005). The cross-cultural adaptation of the DASH questionnaire in Canadian French. *Journal of Hand Therapy*, 18(1), 34-39.
- Ellis, R., Blyth, R., Arnold, N., & Miner-Williams, W. (2017). Is there a relationship between impaired median nerve excursion and carpal tunnel syndrome? A systematic review. *Journal of Hand Therapy*, 30(1), 3-12.
- Erel, E., Dilley, A., Greening, J., Morris, V., Cohen, B., & Lynn, B. (2003). Longitudinal sliding of the median nerve in patients with carpal tunnel syndrome. *J Hand Surg Br*, 28(5), 439-443.
- Ferry, S., Pritchard, T., Keenan, J., Croft, P., & Silman, A. J. (1998). Estimating the prevalence of delayed median nerve conduction in the general population. *Br J Rheumatol*, 37(6), 630-635.
- Haley, S., & Fragala Pinkham, M. (2006). Interpreting change scores of tests and measures used in physical therapy. *Physical therapy*, 86(5), 735-743.
- Hudak, P. L., Amadio, P. C., & Bombardier, C. (1996). Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) [corrected]. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *American journal of industrial medicine*, 29(6), 602-608.
- Ibrahim, I., Khan, W. S., Goddard, N., & Smitham, P. (2012). Carpal tunnel syndrome: a review of the recent literature. *Open Orthop J*, 6, 69-76.
- Impink, B. G., Gagnon, D., Collinger, J. L., & Boninger, M. L. (2010). Repeatability of ultrasonographic median nerve measures. *Muscle & Nerve*, 41(6), 767-773.

- Keith, M. W., Masear, V., Chung, K. C., Amadio, P. C., Andary, M., Barth, R. W., Maupin, K., *et al.* (2010). American Academy of Orthopaedic Surgeons clinical practice guideline on the treatment of carpal tunnel syndrome. *J Bone Joint Surg Am*, 92(1), 218-219.
- Kerns, R. D., Turk, D. C., & Rudy, T. E. (1985). The West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory (WHYMPI). *Pain*, 23(4), 345-356.
- Laliberté, S., Lamoureux, J., Sullivan, M. J. L., Miller, J.-M., Charron, J., & Bouthillier, D. (2008). French translation of the Multidimensional Pain Inventory: L'inventaire multidimensionnel de la douleur. *Pain research & management*, 13(6), 497-505.
- Magee, D. J. (2008). Orthopedic physical assessment. In *Musculoskeletal rehabilitation series* (5th ed., pp. 443-444). St. Louis, Missouri: Saunders Elsevier.
- Malcolm, M. P., Triggs, W. J., Light, K. E., Shechtman, O., Khandekar, G., & Gonzalez Rothi, L. J. (2006). Reliability of motor cortex transcranial magnetic stimulation in four muscle representations. *Clin Neurophysiol*, 117(5), 1037-1046.
- Massé Alarie, H., Flamand, V., Moffet, H., & Schneider, C. (2013). Peripheral neurostimulation and specific motor training of deep abdominal muscles improve posturomotor control in chronic low back pain. *Clinical Journal of Pain*, 29(9), 814-823.
- Nadeau, M. J., Desrochers, A., Lamontagne, M., Lariviere, C., & Gagnon, D. H. (2016). Quantitative ultrasound imaging of Achilles tendon integrity in symptomatic and asymptomatic individuals: reliability and minimal detectable change. *J Foot Ankle Res*, 9, 30.
- Nee, R., & Butler, D. (2006). Management of peripheral neuropathic pain: Integrating neurobiology, neurodynamics, and clinical evidence. *Physical Therapy in Sport*, 7, 36-49. doi:10.1016/j.pts.2005.10.002
- Nijs, J., Meeus, M., Cagnie, B., Roussel, N. A., Dolphens, M., Van Oosterwijck, J., & Danneels, L. (2014). A modern neuroscience approach to chronic spinal pain: combining pain neuroscience education with cognition-targeted motor control training. *Physical therapy*, 94(5), 730-738.
- O'Keefe, D., Lyons, G., Donnelly, A., & Byrne, C. (2001). Stimulus artifact removal using a software-based two-stage peak detection algorithm. *Journal of neuroscience methods*, 109(2), 137-145.
- Oskouei, A., Talebi, G., Shakouri, S., & Ghabili, K. (2014). Effects of neuromobilization maneuver on clinical and electrophysiological measures of patients with carpal tunnel syndrome. *Journal of Physical Therapy Science*, 26(7), 1017-1022.
- Pallant, J. (2007). *SPSS survival manual - A step by step guide to data analysis using SPSS for window* (3 ed.). Maidenhead: Open University Press.
- Paquette, P., Lamontagne, M., Higgins, J., & Gagnon, D. H. (2015). Repeatability and Minimal Detectable Change in Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging. *Ultrasound in medicine & biology*, 41(7), 2082-2086.
- Parker, R. S., Lewis, G. N., Rice, D. A., & McNair, P. J. (2016). Is Motor Cortical Excitability Altered in People with Chronic Pain? A Systematic Review and Meta-Analysis. *Brain Stimul*, 9(4), 488-500.

- Pelletier, R., Higgins, J., & Bourbonnais, D. (2015). Is neuroplasticity in the central nervous system the missing link to our understanding of chronic musculoskeletal disorders? *BMC Musculoskelet Disord*, 16, 25.
- Pelletier, R., Higgins, J., & Bourbonnais, D. (2017). The relationship of corticospinal excitability with pain, motor performance and disability in subjects with chronic wrist/hand pain. *Journal of electromyography and kinesiology*, 34, 65-71.
- Pinar, L., Enhos, A., Ada, S., & Güngör, N. (2005). Can we use nerve gliding exercises in women with carpal tunnel syndrome? *Advances in therapy*, 22(5), 467-475.
- Pleger, B., Ragert, P., Schwenkreis, P., Forster, A. F., Wilimzig, C., Dinse, H., Nicolas, V., *et al.* (2006). Patterns of cortical reorganization parallel impaired tactile discrimination and pain intensity in complex regional pain syndrome. *Neuroimage*, 32(2), 503-510.
- Rossini, P. M., Burke, D., Chen, R., Cohen, L. G., Daskalakis, Z., Di Iorio, R., Di Lazzaro, V., *et al.* (2015). Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. *Clin Neurophysiol*, 126(6), 1071-1107.
- Schabrun, S., Ridding, M., Galea, M., Hodges, P., & Chipchase, L. (2012). Primary sensory and motor cortex excitability are co-modulated in response to peripheral electrical nerve stimulation. *PLoS ONE*, 7(12), e51298.
- Schmid, A., Elliott, J., Strudwick, M., Little, M., & Coppieters, M. (2012). Effect of splinting and exercise on intraneural edema of the median nerve in carpal tunnel syndrome--an MRI study to reveal therapeutic mechanisms. *Journal of orthopaedic research*, 30(8), 1343-1350.
- Schwenkreis, P., Scherens, A., Ronnau, A. K., Hoffken, O., Tegenthoff, M., & Maier, C. (2010). Cortical disinhibition occurs in chronic neuropathic, but not in chronic nociceptive pain. *BMC Neurosci*, 11, 73.
- Shi, Q., Bobos, P., Lalone, E. A., Warren, L., & MacDermid, J. C. (2018). Comparison of the Short-term and Long-term Effects of Surgery and Nonsurgical Intervention in Treating Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review and Meta-analysis. *Hand (N Y)*.
- Sucher, B., & Schreiber, A. (2014). Carpal tunnel syndrome diagnosis. *Physical medicine and rehabilitation clinics of North America*, 25(2), 229-247.
- Tanaka, S., Wild, D. K., Seligman, P. J., Behrens, V., Cameron, L., & Putz-Anderson, V. (1994). The US prevalence of self-reported carpal tunnel syndrome: 1988 National Health Interview Survey data. *Am J Public Health*, 84(11), 1846-1848.
- Tecchio, F., Padua, L., Aprile, I., & Rossini, P. M. (2002). Carpal tunnel syndrome modifies sensory hand cortical somatotopy: a MEG study. *Hum Brain Mapp*, 17(1), 28-36.
- Topp, K., & Boyd, B. (2006). Structure and biomechanics of peripheral nerves: nerve responses to physical stresses and implications for physical therapist practice. *Physical therapy*, 86(1), 92-109.

Tableau IX. Demographic, history and physical examination of participants

Participant	Sex*	Age (year)	Symptomatic side**	Duration of symptoms (months)	Reports of nocturnal exacerbation	Pinprick evaluation	Two-point discrimination evaluation	Tinel's test	Phalen's test
1	F	58	R>L	11	-	2	0	+	+
2	F	58	R	120	+	1	0	-	-
3	F	46	R>L	36	+	0	0	-	+
4	M	31	R>L	10	+	0	1	-	+
5	M	49	R	84	+	0	1	-	-
6	F	41	R	22	+	1	1	-	+
7	F	31	L>R	60	+	1	0	-	+
8	M	31	R>L	23	+	1	0	-	-
9	F	50	R>L	96	+	1	1	-	-
10	M	34	R	96	+	1	1	-	-
11	F	64	L>R	48	+	0	0	-	+
12	F	68	R>L	48	+	0	1	-	+
13	M	28	R	24	-	2	0	-	-
14	M	46	L	9	+	0	0	+	+

Participants were sorted in decreasing order based on their improvement in upper limb functional abilities following completion of the neuromobilization program. Clinical features consistent with carpal tunnel syndrome were: nocturnal exacerbation of symptoms, impaired cutaneous sensitivity in the median nerve territory, a positive Phalen's test or a positive Tinel's test. Pinprick was performed using a standard pin. The sharp and blunt ends were randomly placed at the base of the thenar eminence and the distal phalange of the first and third fingers. Rating was as follows: 0 = normal, 1 = hyposensitivity, 2 = marked hyposensitivity of anesthesia. Two-point discrimination was performed with a commercial caliper graduated with 1 mm increments on the same location as pinprick. Discrimination was assessed by the smallest distance between two points the participant could correctly identify five times out of six. Rating is based on Magee et al. (2008): 0 = normal, 1 = diminished, 2 = impaired, 3 = anesthesia.

*F = female; M = male

**R = right; L = left

Tableau X. Summary of outcome measures

Musculoskeletal ultrasound imaging		T0	T1	Diff (%)	p-Value	Effect size
		Median [interquartile range]	Median [interquartile range]			
Geometry						
Cross sectional area (mm2)	Trans	11.09 [3.15]	11.32 [2.48]	-1.04	.64	0.09
Thickness mean (mm)	Long	3.13 [0.70]	3.08 [0.96]	0.80	.33	0.18
Grayscale distribution						
Echogenicity	Trans	44.51 [9.61]	45.19 [4.79]	-0.75	.64	0.09
	Long	51.42 [13.64]	52.59 [13.14]	1.13	.68	0.08
Variance	Trans	118.66 [59.79]	144.55 [54.18]	-9.84	.88	0.03
	Long	177.51 [73.79]	191.41 [110.50]	3.77	.98	0.01
Skewness	Trans	1.01 [0.60]	1.20 [0.43]	-8.83	.73	0.07
	Long	0.94 [0.46]	0.78 [0.49]	-9.27	.51	0.12
Kurtosis	Trans	5.00 [2.33]	5.27 [1.95]	-2.69	.36	0.17
	Long	4.45 [1.45]	3.90 [1.62]	-6.70	.73	0.07
Entropy	Trans	5.26 [0.27]	5.32 [0.19]	-0.55	.43	0.15
	Long	5.53 [0.29]	5.61 [0.29]	0.71	.68	0.08
Texture						
Contrast	Trans	1.82 [0.66]	1.87 [0.75]	-1.46	.68	0.08
	Long	1.82 [0.56]	1.80 [0.49]	-0.32	.78	0.05
Homogeneity	Trans	0.64 [0.05]	0.63 [0.05]	0.60	.68	0.08
	Long	0.64 [0.03]	0.63 [0.04]	-0.20	.73	0.07
Longitudinal excursion (mm)						
Technique A: wrist only		5.71 [2.81]	5.11 [2.22]	-11.03	.22	0.23
Technique B: Tensioner		4.88 [3.25]	5.11 [3.29]	-4.67	.93	0.02
Technique C: Slider		5.02 [3.07]	4.88 [2.52]	2.85	.78	0.05
Transcranial magnetic stimulation assessment						
RMT (% of capacitor output)		35.50 [8.75]	35.50 [4.50]	0.00	.53	0.12
Recruitment curve slope		Mean = 6.58	Mean = 9.43	35.58	N/A	N/A
Stimuli intensity (% of rMT)						
90%		0.52 [0.98]	0.56 [0.62]	-8.65	.64	0.09
100%		1.46 [2.44]	1.45 [1.31]	0.61	.59	0.11
110%		5.55 [5.08]	4.22 [9.35]	27.22	.30	0.20
120%		10.33 [11.87]	8.70 [16.31]	17.19	.51	0.12
130%		11.94 [12.85]	14.75 [13.14]	-21.05	.88	0.03
140%		17.55 [19.40]	16.84 [25.03]	4.09	.93	0.02
150%		22.13 [18.55]	24.85 [32.93]	-11.57	.51	0.12
160%		22.91 [14.93]	28.27 [26.63]	-20.98	*.04	0.39

Data are median and interquartile range unless otherwise stated. RMT = resting motor threshold

N/A = non-applicable

Figure legends

- Figure 23. Neuromobilization program. Note that the starting positions for week one and two are identical.
- Figure 24. (a) Upper limb disabilities and (b, c, d, e, f) pain domain measurement showing scores before and after completion of the neuromobilization program. Significant differences (marked by asterisks) were found for the upper limb disabilities (DASH: $z = -2.41$, E.S. = 0.46, $p = 0.02$), pain interference and support (WHYMPI: interference $z = -2.98$, E.S. = 0.56, $p < 0.01$; support $z = -2.12$, E.S. = 0.40, $p = 0.03$), while pain severity, life-control and affective distress measures remained similar. Plain dots represent outliers. E.S. = effect size
- Figure 25. (a) Recruitment curves showing Motor Evoked Potentials (MEP) expressed as a ratio between MEP amplitude and maximal compound muscle action potential (Mmax) plotted against different stimulus intensity proportional to the resting motor threshold. A significant increase in MEP amplitude is noted following completion of the neuromobilization program identified by an asterisk.
- (b) Inter-individual differences for each transcranial magnetic stimulation intensity after completion of the neuromobilization program. Individuals who reported significant improvement in upper limb function and pain are identified with black dots. Note that some points may overlap.

FIGURE 23

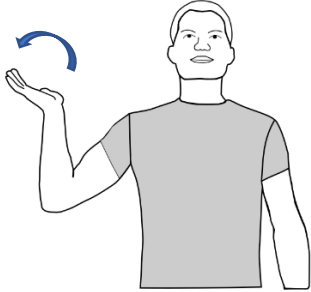
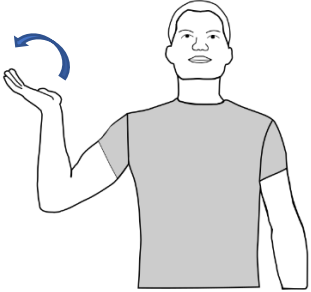
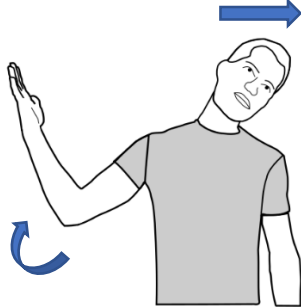
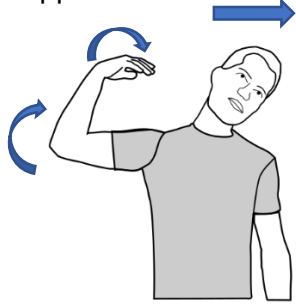
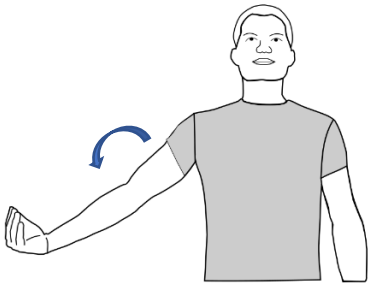
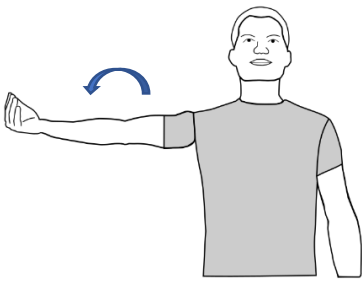
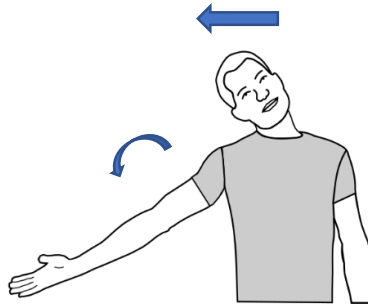
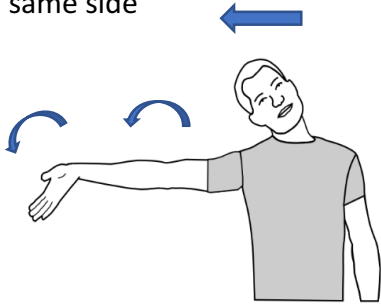
WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4
<p>Starting position: Hold the wrist extended and the elbow flexed</p> 	<p>Starting position: Hold the wrist extended and your elbow flexed</p> 	<p>Starting position: Hold the elbow flexed and the head inclined to the opposite side</p> 	<p>Starting position: Hold the wrist and elbow flexed and your head inclined to the opposite side</p> 
<p>Final position: Extend the elbow completely while folding the wrist</p> 	<p>Final position: Extend the elbow completely while folding the wrist and elevating the shoulder</p> 	<p>Final position: Extend your elbow completely while moving the head toward the same side</p> 	<p>Final position: Extend the wrist and the elbow completely while moving the head toward the same side</p> 

FIGURE 24

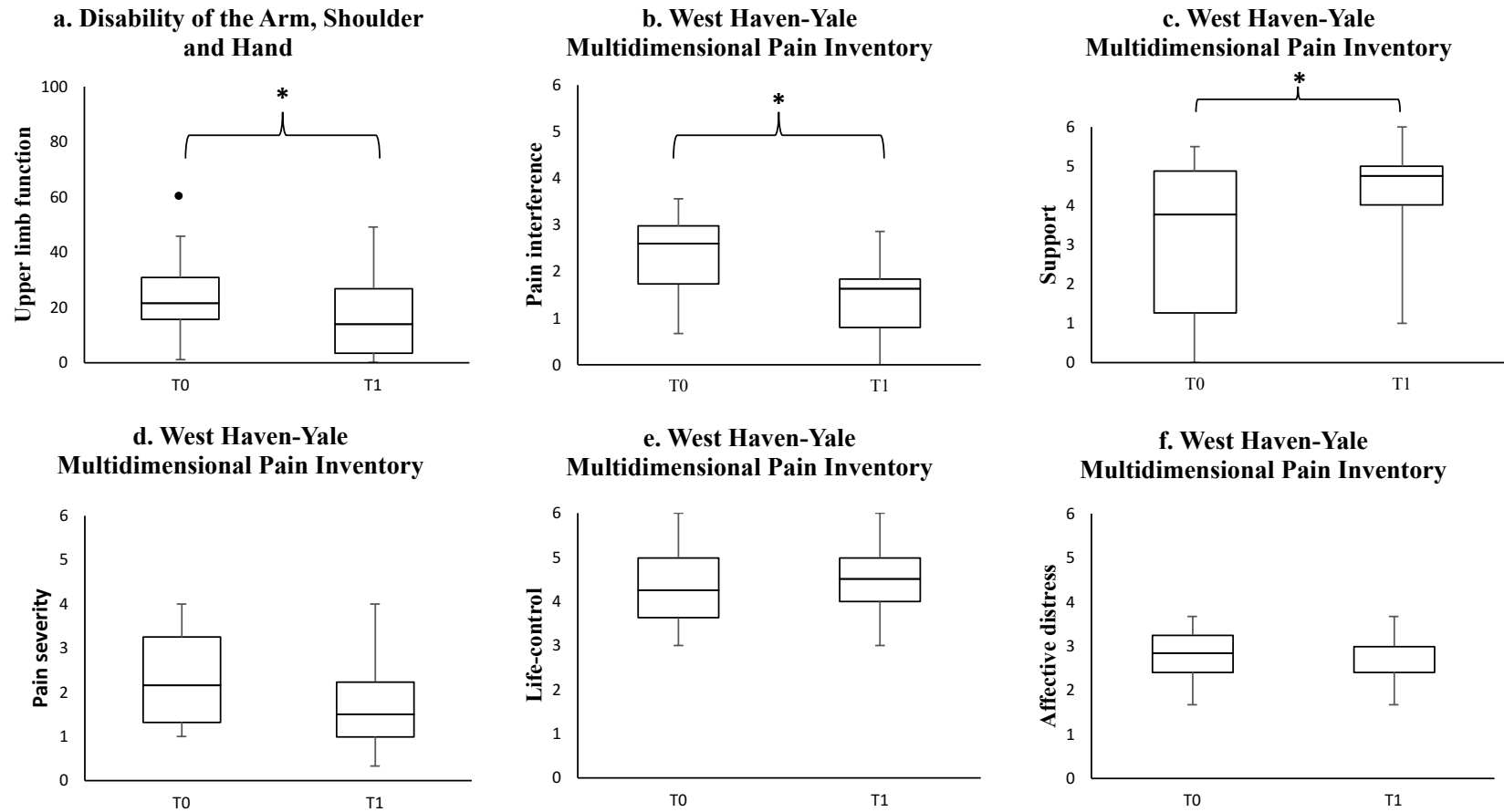
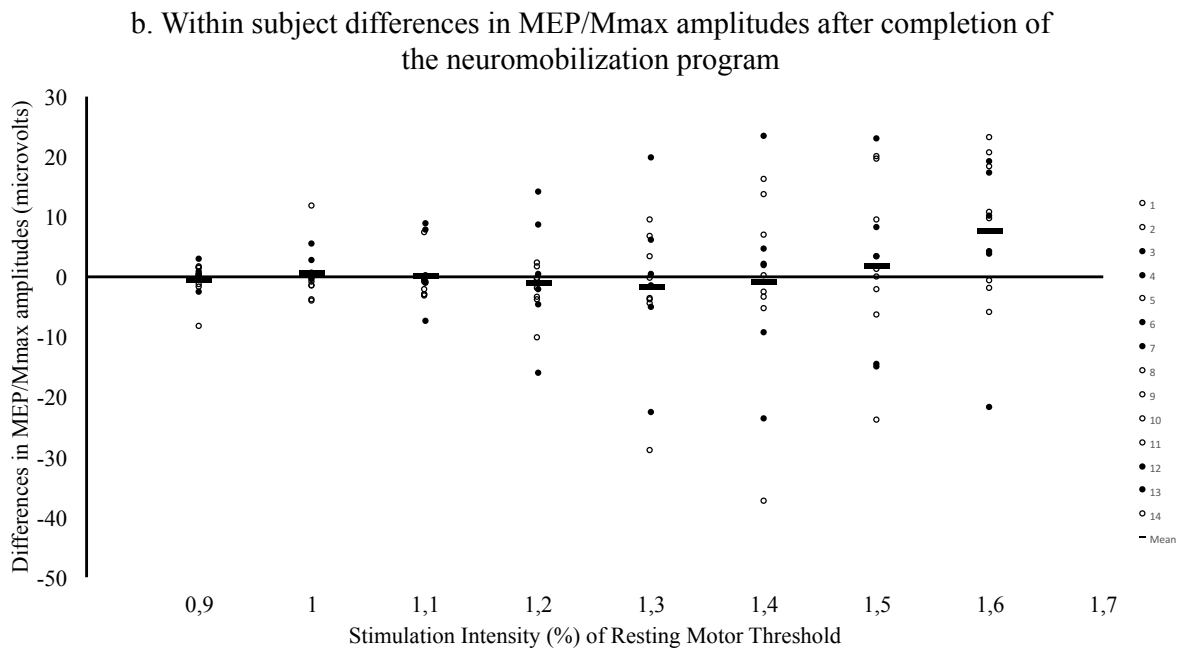
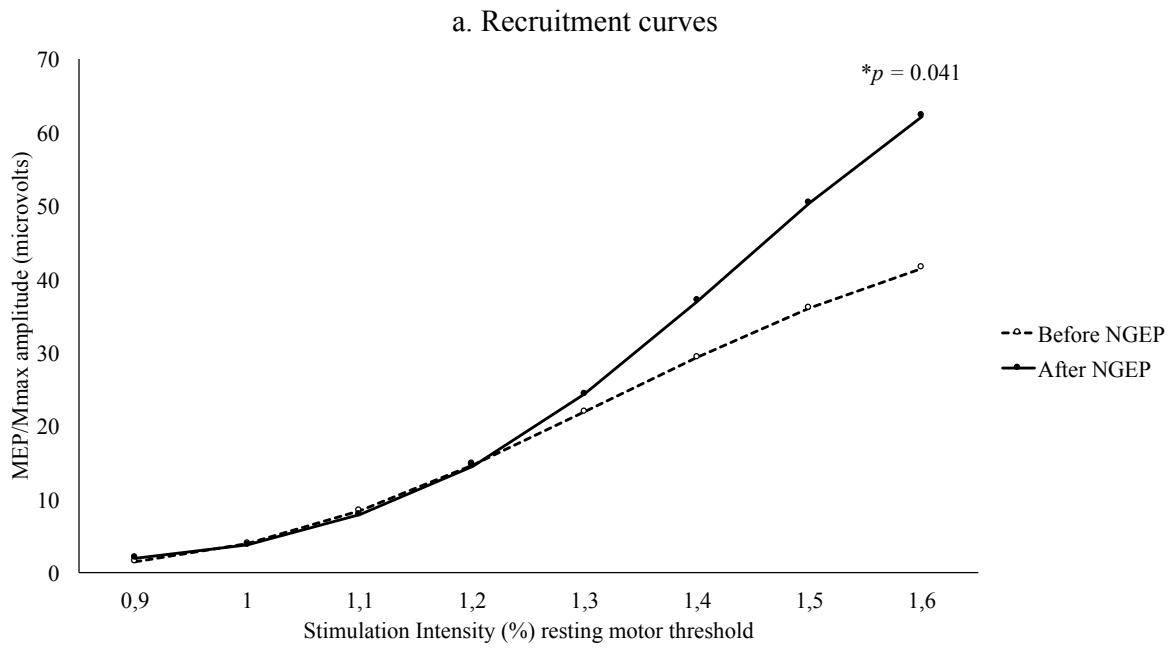


FIGURE 25



5.4. Article n°4: Effects of a preoperative neuromobilization program offered to individuals with carpal tunnel syndrome awaiting carpal tunnel decompression surgery: a pilot randomized controlled study

Philippe Paquette, PT, PhD(c)¹⁻²; Johanne Higgins, OT, PhD.¹⁻², Michel Alain, Danino, MD, FRCSC, Phd.³, Patrick Harris, MD, FRCSC³, Martin Lamontagne, MD, FRCPC⁴, Dany H. Gagnon, PT, PhD.¹⁻²

¹Centre for Interdisciplinary Research in Rehabilitation of Greater Montreal, Institut universitaire sur la réadaptation en déficience physique de Montréal, Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux (CIUSSS) du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal, Montreal, Canada

²School of Rehabilitation, Faculty of Medicine, Université de Montréal, Montreal, Canada

³Department of Surgery, Centre Hospitalier de l'Université de Montréal, Montreal, Canada

⁴Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Centre Hospitalier de l'Université de Montréal, Montreal, Canada

Article soumis pour révision initiale dans la revue *Journal of Hand Therapy*

À titre d'auteur principal, j'ai contribué significativement et majoritairement à l'élaboration du protocole expérimental et de la méthodologie, ainsi qu'à la collecte de données, l'analyse et l'interprétation des résultats. Mes directeurs de recherche ont également contribué au développement du protocole expérimental, de la méthodologie et ont encadré la rédaction du manuscrit. Les Drs Michel Alain Danino, Patrick Harris et Martin Lamontagne ont contribué à la réalisation du projet au sein du CHUM, au développement de la méthodologie, ainsi qu'au recrutement des participants. Tous les auteurs ont contribué à la révision du contenu intellectuel du manuscrit et ont approuvé la version finale.

5.4.1. Avant-propos

Les exercices neurodynamiques sont recommandés aux individus atteints du STC après une opération de décompression pour accélérer et optimiser les résultats postopératoires (Peters, Page *et al.*, 2016). Engager des individus atteints du STC dans un programme d'exercices préopératoire représente une stratégie potentiellement efficace pour améliorer encore ces résultats. Toutefois, peu d'études ont évalué la faisabilité et la sécurité d'un programme d'exercices neurodynamique complétés à domicile alors que l'efficacité de programme pour améliorer les douleurs et les capacités fonctionnelles du membre supérieure demeure controversée. Afin de vérifier ces éléments, nous avons élaboré une étude randomisée pilote où 30 individus ont été aléatoirement assigné à compléter un programme d'exercices neurodynamique ou aucun programme, conformément à la pratique actuelle. Cette étude s'inscrit dans le deuxième volet de cette thèse et a pour objectif d'évaluer la faisabilité d'un programme d'exercices neurodynamiques préopératoire exécuté par des individus atteints du syndrome du tunnel carpien en attente d'une première chirurgie et d'évaluer l'efficacité de ce programme chez ces même individus pour améliorer l'intégrité biologique, les propriétés biomécaniques du nerf médian; réduire la douleur, les déficiences sensorimotrices et optimiser la capacité fonctionnelle du membre supérieur en comparaison à un groupe contrôle ne complétant aucun programme d'exercice avant et après la chirurgie de décompression du tunnel carpien. Les changements apportés au protocole d'évaluation de l'excursion longitudinale du nerf médian ont été maintenus pour cette étude, c.-à-d. que seule la position d'évaluation avec 45° d'abduction de l'épaule fut retenue pour les mêmes raisons (voir 5.3.1). De plus, la taille d'effet modérée ($r = 0,23$) obtenue pour l'excursion longitudinale lors la manœuvre d'extension du poignet, nous a incité à conserver celle-ci dans notre protocole.

5.4.2. Abstract

Background: Engaging individuals with carpal tunnel syndrome (CTS) awaiting carpal tunnel decompression surgery in a preoperative rehabilitation program may mitigate pain and sensorimotor impairments, enhance functional abilities prior to surgery, and improve postoperative outcomes.

Purpose: To assess the feasibility and the efficacy of a novel preoperative neuromobilization exercise program (NEP).

Study Design: Pilot randomized controlled trial with parallel groups

Methods: Thirty individuals with CTS were randomly allocated into a four-week home-based neuromobilization exercise group or a standard care group while awaiting surgery. Outcome measures included feasibility (i.e. recruitment, attrition, adherence, satisfaction and safety) and efficacy metrics (i.e. median nerve integrity and neurodynamics, tip pinch grip, pain and upper limb functional abilities) collected prior to (i.e. at baseline and about four weeks later) and four weeks following surgery.

Results: Thirty individuals with CTS were recruited (recruitment rate = 11.8%), and 25 completed the study (attrition rate = 16.7%). Adherence (94%) and satisfaction with the program (e.g. enjoy the exercises and likeliness to repeat the NEP ($\geq 4.2 / 5$)) were high and no serious adverse event was reported. NEP-related immediate pre- and post-surgery beneficial effects on pain-interference were documented ($p = .05$, $\eta^2 = .10$), while an overall increased neurodynamics ($p = .04$, $\eta^2 = .11$) and decreased pain severity ($p = .01$, $\eta^2 = .21$) were observed.

Conclusion: The preoperative NEP completed by individuals with CTS awaiting surgery is feasible, acceptable, and safe. The program had limited beneficial effects on pre- and post-surgery outcomes. Revision of the program's content and attribute is recommended.

5.4.3. Introduction

Rehabilitation exercises are recommended to individuals with Carpal Tunnel Syndrome (CTS) following decompression surgery to accelerate and optimize post-surgical outcomes (Peters *et al.*, 2016). Engaging individuals with CTS in preoperative rehabilitation exercises (i.e., prehabilitation) represents a potentially effective strategy to further improve these outcomes. Recent evidence shows that completion of preoperative exercises reduces pain, increases strength, and maximizes functional performance among individuals awaiting lower limb orthopaedic surgeries while also potentiating their recovery (Desmeules, Hall, & Woodhouse, 2013; Rooks, Huang *et al.*, 2006). Additionally, preoperative exercises are typically delivered at home at low cost with a limited need for equipment or direct supervision while also improving patient engagement and mitigating the burden of waiting (Brown, Loprinzi *et al.*, 2014; Oudhoff, Timmermans *et al.*, 2007). Neuromobilization exercises, commonly used among individuals with CTS, align perfectly with these attributes.

Neuromobilization exercises may improve CTS symptoms through physiological effects on the biological integrity of the median nerve by increasing fluid dispersion and reducing intraneural oedema (Basson *et al.*, 2017; Boudier-Reveret, Gilbert *et al.*, 2017; A. Schmid *et al.*, 2012). In addition, neuromobilization exercises can influence the biomechanical properties (i.e. neurodynamics) of the nerve median, as demonstrated by the different effects of *sliding* and *tensioning* techniques, which aim to either promote longitudinal nerve excursion or nerve strain capability, respectively (M. Coppieters & Butler, 2008; M. Coppieters, Hough, & Dilley, 2009). In turn, both changes in the biological integrity and the neurodynamics of peripheral nerve can be characterized using quantitative ultrasound imaging (QUI) (R. Ellis, Blyth *et al.*, 2017; Martinoli, Tagliafico *et al.*, 2007; Watanabe, Ito *et al.*, 2010). Distinctive features such as enlargement (i.e., increased cross-section area) and hypoechoic appearance (i.e., reduced echogenicity) have been reported in median, ulnar, and common fibular neuropathies (Boom & Visser, 2012; H. Lee, Brekelmans, & Visser, 2016; Tagliafico, Tagliafico, & Martinoli, 2010; Watanabe *et al.*, 2010). There is also emerging evidence that median nerve excursion is reduced in individuals with CTS (R. Ellis *et al.*, 2017), while it has been suggested that improving nerve excursion may be beneficial for those individuals (Pinar *et al.*, 2005; Rozmaryn *et al.*, 1998; Tuzuner, Ozkaynak *et al.*, 2004). Very few studies, however, have quantified the potentially

different effects of a specific type of exercise on the median nerve's biological integrity and neurodynamics nor reported participant adherence to neuromobilization exercises (Brininger *et al.*, 2007; Heebner & Roddey, 2008; A. Schmid *et al.*, 2012). In fact, systematic reviews highlight the paucity of evidence supporting the effectiveness of neuromobilization exercises in individuals with CTS, while no prior study looked at their efficacy in a prehabilitation context (Ballesterio-Perez, Plaza-Manzano *et al.*, 2017; Basson *et al.*, 2017). Hence, additional evidence is needed to quantify the potential effects of a neuromobilization exercise program (NEP).

This pilot study aims to assess the effects of a novel preoperative home-based NEP in comparison to current clinical practice (i.e., waiting list – no intervention) in individuals with CTS while awaiting and following decompressive surgery. Specifically, the objectives were to: 1) determine the feasibility of the NEP based on feasibility metrics (i.e., recruitment, attrition, adherence, safety, and satisfaction); and 2) examine the efficacy of the NEP based on efficacy metrics (i.e., median nerve integrity and neurodynamics, tip pinch grip, pain and upper limb functional abilities). The results of this pilot study will provide valuable information to guide the development of future large-scale clinical trials investigating the effectiveness of an NEP in individuals with CTS.

5.4.4. Method

5.4.4.1. Trial design and randomization

A parallel-group, pilot randomized controlled trial, involving participants undergoing carpal tunnel decompressive surgery, was conducted. Participants were randomly assigned to either complete an NEP or no intervention using a 1:1 allocation ratio derived from a computer-generated random assignment sequence. To balance sample size across both groups over time, a block randomization strategy with a fixed block size of four participants was used. A member of the research team, who was not directly involved in the study, concealed group assignments in sealed opaque envelopes numbered sequentially. The group allocation was revealed at the end of the baseline evaluation for each participant. Outcome measures were collected during pre-intervention (T0: baseline), post-intervention (T1: +/- five days prior to surgery), and follow-up visits (T2: four weeks after surgery). Participants were scheduled for their surgery approximately five weeks following randomization. This study was approved by the research

ethics committee of the research centre at *Centre hospitalier de l'Université de Montréal* (CHUM; #MP-02-2016-5999) and was registered (ClinicalTrials.gov; NCT03582735).

5.4.4.2. Participants

Following a preoperative appointment at the Department of Plastic Surgery (CHUM), potential participants (age range: 18 to 70 years) who had a diagnostic of CTS confirmed via an electrodiagnostic test were informed about the study. Having expressed an interest in participating, they were then contacted by one of the investigators (P.P.) to explain the study and confirm their eligibility. Potential participants were excluded if they 1) presented with diabetes, thyroid disease, rheumatoid arthritis, or an ongoing systemic illness (e.g. cancer, systemic vasculitis), 2) had a previous carpal tunnel decompression (revision surgery), 3) were pregnant or had recently (<3 months) given birth, 4) were unable to perform active movements of the upper limb and neck, or 5) were unable to communicate in either French or English. Eligible participants attended a pre-intervention evaluation at the Department of Physical Medicine & Rehabilitation (CHUM) during which they reviewed and signed the consent form.

5.4.4.3. Intervention

Participants allocated to the experimental group were instructed to perform a four-week progressive home-based NEP consisting of four distinct exercises involving specific movements of the upper limb and neck (Figure 26). The program was developed based on neurodynamic sliding techniques derived from clinical viewpoint and modern biomechanical concepts of neuromobilizations (M. Coppieters & Butler, 2008; M. Coppieters, Hough, & Dilley, 2009). Its final features were validated during a two-round iterative process involving two physiotherapists with extensive clinical experience with neuromobilization. The program parameters involved 15 repetitions of one of the proposed neuromobilization three times daily, separated by at least 3 hours (45 repetitions/day total), which is in line with the exercise load reported in prior studies investigating the effects of neuromobilization among individuals with CTS (Akalin *et al.*, 2002; Brininger *et al.*, 2007; Heebner & Roddey, 2008). Completing the program was expected to take approximately 15 minutes/day. Additionally, participants attended weekly videoconference sessions during which they could review exercise execution and discuss progression with one

of the investigators (P.P.). Lastly, participants documented daily the number of repetitions performed as well as any symptoms prior to or following the program in a logbook.

Participants allocated to the control group did not complete any specific tasks or interventions, as per current practice. During the four-week period, they also participated in three weekly videoconference sessions with one of the investigators (P.P.) during which they could ask any questions related to their trajectory of care or ongoing symptoms.

All participants underwent ambulatory surgeries at the CHUM that were performed by one of three treating plastic surgeons who were blinded to participant group allocation. The surgeons performed a standard open carpal tunnel decompression surgery involving a short palmar incision (2-cm) under local anesthesia and tourniquet control. After surgery, participants were advised to keep their fingers moving and progressively return to their normal daily activities while avoiding excessive physical activity of their hands until they met with their surgeons the following week to control for postoperative complications.

5.4.4.4. Outcomes measures

Feasibility

Feasibility metrics included the recruitment, attrition, adherence rates, as well as the safety and satisfaction of participants who completed the NEP. Recruitment rate was assessed by the proportion of participants assessed for eligibility who were effectively randomized. Attrition rate was assessed by the number of participants exiting the study before either T1 and T2. Adherence rate to the NEP was assessed by collecting self-reported information embedded in participants' logbooks and through the weekly videoconferencing sessions. Adherence was deemed acceptable when participants performed at least 75% of the 45 repetitions recommended daily. Safety of the NEP was assessed by the number of adverse events, which were defined as any unfavorable change in health reported between T0 and T1 or concealed in the logbooks between T0 and T1. As per CONSORT recommendations, attention was given to capture the expectedness (expected vs. unexpected events), potential relation with the experimental intervention (not related, possibly related, or study-related), and severity of adverse events, including reports of serious adverse events resulting in rehospitalisation or persistent significant impairments or disability (Ioannidis, Evans *et al.*, 2004). Lastly, participant satisfaction was

assessed using six statements rated on a 5-point Likert scale ranging from 1 (Not at all) to 5 (Very much) that captured their global appreciation of the program and likeliness to repeat or recommend it.

Efficacy

Biological integrity and neurodynamics of the median nerve: Participants were assessed using musculoskeletal ultrasound imaging by an investigator (P.P.). The median nerve was scanned using two linear transducers with a central frequency of 18 MHz (40 mm footprint) for static and 12 MHz (55 mm footprint) for dynamic assessments, both connected to a Toshiba Aplio 500 ultrasound system (Toshiba America, Inc.). Participants rested supine on an examination table specially equipped with a pivoting support for the head and arm support on the side. As per previous reliability studies, three static images of the median nerve were acquired in the transverse plane at the carpal tunnel inlet, while three dynamic recordings of the nerve's longitudinal excursion were acquired at 5-cm proximal to the wrist crease (Impink *et al.*, 2010; Paquette, Lamontagne *et al.*, 2015). In addition, dynamic recordings included two different nerve-gliding techniques passively performed to elicit nerve excursion: 1) extension of the wrist, and 2) extension of the wrist combined with ipsilateral 30° neck side flexion (i.e., sliding technique) (Paquette *et al.*, 2015). Image analyses were performed offline using custom software developed in the MATLAB environment (Image Processing Toolbox, The MathWorks, Natick, MA). The median nerve's biological integrity was defined by geometrical (i.e., cross-sectional area [CSA]) and grayscale (i.e., echogenicity) measures extracted from regions of interest traced over the inner contour of the nerve (M. J. Nadeau, Desrochers, Lamontagne, Lariviere *et al.*, 2016). A CSA measure between 10-12 mm² is indicative of mild CTS, while CSA above 15 mm² is associated with severe electrophysiological findings (El Miedany, Aty, & Ashour, 2004; Mondelli, Filippou *et al.*, 2008; Moran *et al.*, 2009). Excellent reliability ($\Phi = 0.99$) and good accuracy (normative minimal detectable change [MDC_{norm}] = 5.08%) have been reported for CSA measure of the median nerve at the proximal carpal tunnel (Impink *et al.*, 2010). To complement the geometrical assessment of the median nerve, a quantitative analysis of the mean echogenicity was performed. An hypoechoic appearance (i.e., low mean echogenicity) is suggestive of intraneural oedema based on qualitative evaluation, while recent quantitative scales have found positive associations between hypoechogenicity and

ulnar nerve enlargement as well as rotator cuff tendons impairments (Boom & Visser, 2012; Collinger *et al.*, 2010; Tagliafico, Rubino *et al.*, 2007). However, a normative value has not yet been established for the median nerve. Considering that moderate reliability ($\Phi = 0.58$) and accuracy ($MDC_{\text{norm}} = 34.95\%$) have been reported, the mean echogenicity was assessed as an exploratory outcome of the median nerve's integrity (Impink *et al.*, 2010). Median nerve neurodynamics were defined by computing the mean amplitude and direction changes in positions of three regions of interests selected alongside the nerve using a frame-by-frame cross-correlation algorithm (see figure 27) (A. Dilley *et al.*, 2001). Good reliability ($\Phi = 0.84$) and moderate accuracy ($MDC_{\text{norm}} = 34.10\%$) of median nerve longitudinal excursion has been reported using this protocol (Paquette *et al.*, 2015).

Tip pinch grip assessment: Tip pinch grip strength was assessed using a manual dynamometer (hydraulic pinch gauge, Saehan Corporation) (Jo Geere, Chester, Kale, & Jerosch Herold, 2007). Participants were asked to perform a maximal pinch grip by pressing the gauge between the tip of their thumb and index finger. Standardized verbal encouragement was given. The average of three trials was calculated and defined as the maximal tip pinch grip strength measured in kilograms. Good reliability ($ICC = 0.84$) of tip pinch strength as previously been reported for individuals with CTS (J. Burke, Buchberger *et al.*, 2007).

Pain and upper limb functional abilities: Pain was assessed with the West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory (WHYMPI) (Kerns, Turk, & Rudy, 1985). The WHYMPI includes 52 questions organized around specific subscales, with two subscales specifically targeting pain experience: pain interference (9 items) and pain severity (3 items). Each question is rated on a Likert scale ranging from 0 (no interference, no pain) to 6 (extreme interference, very intense pain); a mean score is computed for each subscale. A higher mean score (range 0-6) represents a worse pain experience. The WHYMPI is a valid tool to assess chronic pain populations including fibromyalgia, (Broderick, Junghaenel, & Turk, 2004) whiplash, (Olsson, Bunketorp *et al.*, 2002) low back pain and neck pain, (Laliberté *et al.*, 2008) and has previously been used as an outcome measure in a clinical study among individuals with CTS (Breuer, Sperber *et al.*, 2006). Good to excellent reliability (Cronbach's $\alpha = 0.72$ and 0.90 for pain severity and interference subscales, respectively) has been reported (Kerns, Turk, & Rudy, 1985). Upper limb functional abilities were assessed with the Disability of the Arm, Shoulder, and Hand Questionnaire (DASH) (Hudak, Amadio, & Bombardier, 1996). The DASH includes 30

questions covering participation and performance of daily activities in individuals with musculoskeletal upper limb disabilities. Each question is rated on a Likert scale ranging from 1 (no difficulty) to 5 (unable), where a higher score (range 0-100) represents substantial functional limitations. The DASH is well known for its satisfactory reliability and validity among individuals with upper limb disabilities and as comparable responsiveness to the Boston carpal tunnel syndrome-specific questionnaire (Beaton *et al.*, 2001; Durand *et al.*, 2005; Greenslade *et al.*, 2004; Gummesson, Atroshi, & Ekdahl, 2003). Additionally, both scales are available in a validated French version (Durand *et al.*, 2005; Laliberté *et al.*, 2008).

5.4.4.5. Statistical analyses

Descriptive statistics were used to summarize participant characteristics and assess feasibility metrics. Efficacy metrics for median nerve integrity and neurodynamics, tip pinch grip strength, pain and upper limb functional ability outcome measures were assessed using two-way mixed model analyses of variance (ANOVAs). In the absence of an interaction between variables, main effects were analysed. Post-hoc pairwise comparisons were performed with Bonferroni adjustment for p -value. Effect sizes were estimated using partial eta-square (η^2) and interpreted as follows: small $\geq .01$, medium $\geq .06$, and large $\geq .14$ (Portney & Watkins, 2009). Multiple imputations were used to account for missing data in efficacy metrics. In both groups, five imputed datasets were generated for each outcome using linear regressions. A dataset encompassing the pooled results from these imputations was produced and selected to conduct the intention-to-treat analyses. Per protocol analyses were also performed for comparison purposes. The significance level was set at $p \leq .05$. All statistical analyses were performed using SPSS (v25, IBM Corp.).

5.4.5. Results

5.4.5.1. Feasibility

Thirty participants (recruitment rate = 11.8%) enrolled at T0 (between September 7, 2015, and June 7, 2018) and were randomized to the experimental ($n = 15$) and control ($n = 15$) groups (Figure 28). At T1, two participants in both the experimental and control groups had dropped out of the study [EXP: $n = 2/15$ (13.3%); CTRL: $n = 2/15$ (13.3%)]. At T2, another

participant in the experimental group had dropped out of the study [EXP: $n = 3/15$ (20%)]. Thus, 12 participants in the experimental group and 13 participants in the control group completed the study. Demographic information and baseline characteristics were similar between groups at T0 (Table XI).

At T1, the logbooks of participants who completed the NEP confirmed a mean adherence rate to the NEP of 94% with a range varying between 44% and 200%. The adherence rate was considered acceptable in 10 of 13 participants.

Regarding safety, three participants who completed the NEP reported adverse events during the study; one stopped the NEP due to an adverse event. These adverse events were: exacerbation of concomitant neck pain (expected, study-related), exacerbation of paresthesia (expected, study-related), and exacerbation of hand pain following surgery (unexpected, possibly related). No serious adverse events were recorded during the study.

The satisfaction questionnaires were retrieved from nine participants at T2 (Table XII). Overall, participants appreciated the exercises, found them easy to perform at home, and were likely to repeat their experience. However, they were ambivalent about the perceived improvements in their condition or symptoms upon completion of the program.

5.4.5.2. Efficacy

Descriptive statistics and statistical analyzes for all efficacy outcomes are presented in table XIII and figure 29, respectively. There was no significant group-by-time interaction for median nerve integrity ($p > .227$) and neurodynamics ($p > .363$) measures. The main effect of group showed a large statistically significant difference in mean median nerve echogenicity ($p = .011$, $\eta^2 = .209$). The experimental group had, overall, a higher mean echogenicity [absolute mean difference = 9.49 (relative difference $9.49 / 256 = 3.71\%$), 95% CI: 3.00 to 15.97, *adjusted* $p = .006$, $\eta^2 = .243$] compared to the control group. The main effect of time showed a moderate statistically significant difference in mean nerve excursion using the second neurodynamic technique ($p = .040$, $\eta^2 = .108$). However, the overall mean excursion measures were not statistically significant difference across times despite a tendency towards increased values between T0 and T1 (absolute mean difference = 0.80 mm, 95% CI: -0.05 to 1.65, *adjusted* $p = .072$).

There was no significant group-by-time interaction for tip pinch grip strength ($p = .186$) measures. The main effect of time showed a large statistically significant difference in the overall mean pinch grip strength ($p < .001$, $\eta^2 = .282$), which decreased between T0 and T2 (absolute mean difference = -0.89 Kg, 95% CI: -1.40 to -0.38, *adjusted* $p < .001$) and between T1 and T2 (absolute mean difference = -0.57 Kg, 95% CI: -1.11 to -0.03, *adjusted* $p = .038$).

There was a tendency for a statistically significant group-by-time interaction for pain interference measures ($p = .052$, $\eta^2 = .100$). Further examination of the data plot revealed that participants who completed the NEP tended to report lower levels of pain interference at the end of the study (see figure 28). To explore this potential interaction further, a per protocol analysis was conducted, but did not reach statistical significance ($p = .094$, $\eta^2 = .098$). Also, there was no significant group-by-time interaction for pain severity ($p = .824$) or upper limb functional abilities ($p = .846$) measures. The main effect of time showed a moderate and large statistically significant difference in mean pain interference ($p = .039$, $\eta^2 = .109$) and in mean pain severity ($p = .006$, $\eta^2 = .197$), respectively. However, the overall mean pain interference score was not significantly difference across times despite a small tendency towards a decrease in pain interference between T0 and T2 (absolute mean difference = -0.46, 95% CI: -0.97 to 0.05, *adjusted* $p = .086$). In contrast, the overall mean pain severity score decreased between T0 and T2 (absolute mean difference = -1.00, 95% CI: -1.81 to -0.19, *adjusted* $p = .012$).

5.4.6. Discussion

The preoperative neuromobilization exercise program is feasible, acceptable, and safe.

Overall, the feasibility metrics reported support the first hypothesis that the proposed preoperative home-based neuromobilization exercises are acceptable, safe and feasible when completed by individuals awaiting carpal tunnel decompression. The recruitment rate in this study, which reached 11.8% over a 32-month period, appears lower than rates (18%-54%) previously reported in the literature involving individuals with CTS (Burke, Buchberger et al., 2007; Schmid et al., 2012). The recruitment rate could have been higher since a large proportion ($65/135 = 48.1\%$) of potential participants were excluded due to the comprehensive list of exclusion criteria developed to circumscribe the effects of the NEP. Future larger trials may consider adopting a pragmatic approach with the inclusion of all individuals with CTS awaiting

decompression surgery, regardless of their comorbidities, to accurately portray current clinical practice. Also, the attrition rate in this study is consistent with other rates (12.5%-25%) reported in the literature involving individuals with CTS (Andreu, Ly Pen et al., 2014; Heebner & Roddey, 2008). Moreover, attrition occurred almost equally in both groups (n = 3 experimental; n = 2 control) and was unrelated to group assignment. The high proportion of participants who achieved good adherence to the exercises (10/13 = 76.9%) confirms that the NEP can be easily integrated into a daily routine. Likewise, the high participant adherence was reflected in the feedback questionnaire by the strong agreement with items related to satisfaction, performance at home, and likeliness to repeat the experience. Last, the absence of serious adverse events suggests that the NEP is relatively safe. Moreover, the participants who reported increased symptoms related to the NEP were managed through personalized counselling with one of the investigator (P.P.) and rapidly displayed improvements in those symptoms prior to the end of the study. In perspective, transient exacerbation of pain is frequently reported among other populations, such as individuals with knee and hip osteoarthritis, who engage in exercise programs (Bennell & Hinman, 2011). These findings suggest that neuromobilization exercises are well tolerated, although exacerbations of pre-existing symptoms may occur.

The preoperative neuromobilization exercise program has beneficial, although limited, effects on some pre- and post-surgical outcomes.

Overall, the main findings of this study partially support our second hypothesis that individuals with CTS who engaged in the proposed NEP would display greater improvement prior to and after carpal tunnel decompression surgery when compared to their counterparts. While changes in the morphology of the median nerve on QUI may only become measurable after a certain delay (i.e. three months), especially those that relate to the cross-sectional area, early changes such as fluid dispersion, decreased intraneural oedema and longitudinal nerve excursion were still anticipated (Kim, Koh, & Choi, 2016). In fact, our results did indicate such a tendency although the magnitude of change in nerve echogenicity ($\Delta \leq 3.7\%$), and nerve excursion ($\Delta \leq 7.0\%$) did not exceed MDC thresholds (i.e., MDC = 34.95% and 34.10%, respectively) previously reported (Impink *et al.*, 2010; Paquette *et al.*, 2015). While that these preliminary results require confirmation, they should prompt interest in QUI assessment on

individuals with CTS since the mechanisms whereby neuromobilization exercises may improve the integrity of the median nerve are not completely understood at the present time.

The reduction in tip pinch grip strength observed after decompressive surgery was expected and has been documented widely and is likely to fully recuperate over a longer period of time (i.e., within three months of surgery) (Geere *et al.*, 2007). It was anticipated that completing the NEP might mitigate to a certain extent the consequence of the surgery. However, since no group difference was observed, it is likely that the NEP had no short-term effect to prevent immediate tip pinch strength weakness.

The main finding of this study is that individuals completing the NEP tend to report greater decrease in pain interference following surgery. This supports our hypothesis that individuals with CTS might benefit from engaging in preoperative exercises. In contrast, both groups reported a large significant decrease in pain severity which was not potentiated by the NEP. Instead, the decrease in pain severity may be predominantly attributed to surgery. Also, no change was observed for upper limb functional abilities, although functional changes are also not expected immediately following surgery during the convalescence period and may only become apparent after a longer follow-up (e.g. six months) (Heebner & Roddey, 2008; Uchiyama, Itsubo *et al.*, 2010).

Altogether, these preliminary findings suggest that completing the proposed NEP, in its current form, has limited immediate effect as a stand-alone preoperative intervention for individuals with CTS. Hence, there is a need to revise the programs parameters in terms of dosage and intervention duration. Yet, increasing only the dose may be insufficient to induce clinical change, as evidenced by prior studies which reported that completing a four-week program involving the repetition of six different neuromobilization hand positions, 3-5 times daily (180-300 repetitions/day total), did not improve symptoms or function in individuals with CTS in comparison to a control intervention (Brininger *et al.*, 2007; Heebner & Roddey, 2008). In turn, future studies could focus on using tailored exercise intensity, perhaps through progressions including *tensioning* techniques once the sensitivity of the neural tissue is decreased, as well as NEP pre-operative duration for neuromusculoskeletal adaptations to develop (Nee & Butler, 2006). Also, expanding the proposed NEP by adding other components including desensitization manoeuvres such as soft tissue mobilizations, tendon gliding exercises

(Fernandez-de-Las Penas, Ortega-Santiago *et al.*, 2015), and novel therapies promoting corticospinal plasticity such as repetitive transcranial magnetic (Pelletier, Higgins, & Bourbonnais, 2015), may also be considered.

5.4.6.1. Limits

Although the study suggests that the NEP is feasible, acceptable, and safe, several limitations are noteworthy and most likely impacted efficacy. Among those, the relatively small number of participants in each group is a key limit, although the current sample size was sufficient to test most of the research hypotheses and generate medium-to-large effect sizes. A larger sample size could have resulted in additional statistical differences, especially for pain interference and neurodynamics measures given their medium effect size (0.108) and may have allowed subgroup analyses based on CTS severity, duration, or sex as examples. Another limit of this study is the relatively light exercise dose (number of repetitions; number of exercises) and the relatively short exercise duration and follow-up period needed for the anticipated peripheral musculoskeletal adaptations to develop and consolidate during and after the NEP. Nevertheless, the duration of the intervention and follow-up periods were selected based on previous studies (Brininger *et al.*, 2007; Heebner & Roddey, 2008; Schmid *et al.*, 2012), as well as the limited time and funding available to complete this pilot study. Lastly, exercise adherence was monitored through self-reporting which may introduce desirability bias, and thus overestimation of the actual compliance rate. Revising the NEP attributes will be essential before further investigating the effects of neuromobilization exercises completed by individuals with CTS.

5.4.7. Clinical messages

A four-week home-based NEP offered to individuals with CTS awaiting surgery is feasible, acceptable, and safe, although CTS-related symptoms or neck pain may be exacerbated. Engaging and completing the proposed preoperative NEP has limited beneficial effects on pain interference prior to and immediately after surgery. However, expending on the program's attribute is recommended prior to proceeding to large scale trials investigating the efficacy of neuromobilizations exercises completed by individuals with CTS.

5.4.8. Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the contribution of Drs Ali Izadpanah and Joseph Bou-Merhi for their assistance with recruitment and their key collaboration as treating surgeons during this project. Special thanks are also extended to the support staff of the *Service de Chirurgie Plastique* and *Service de physiatrie* of the *Centre Hospitalier de l'Université de Montréal* for their collaboration in development of this project. We also thank the contribution of Josée Arsenault, OT, MSc for her counselling in the early phase of the project, and Raymonde Fortin, PT, DSc and Diane Racette, PT for their expert feedback on the neuromobilization exercise program.

Funding statements

This work was supported by a joint grant award program from the “Ordre professionnel de la Physiothérapie du Québec” and the Quebec Rehabilitation Research Network (REPAR) [#5047]

P.P. is supported by a doctoral scholarship from the Fonds de Recherche Québec - Santé (FRQS). D.G. co-chairs the Initiative for the Development of New Technologies and Practices in Rehabilitation (INSPIRE) funded by the LRH Foundation and co-led the Rehabilitation Interventions for Individuals with a SCI in the Community research team funded by the Ontario Neurotrauma Foundation and the Quebec Rehabilitation Research Network

5.4.9. References

- Akalin, E., El, O., Peker, O., Senocak, O., Tamci, S., Gulbahar, S., Cakmur, R., *et al.* (2002). Treatment of carpal tunnel syndrome with nerve and tendon gliding exercises. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 81(2), 108-113
- Andreu, J., Ly Pen, D., Millán, I., de Blas, G., & Sánchez Olaso, A. (2014). Local injection versus surgery in carpal tunnel syndrome: neurophysiologic outcomes of a randomized clinical trial. *Clinical neurophysiology*, 125(7), 1479-1484.
- Ballesteros-Perez, R., Plaza-Manzano, G., Urraca-Gesto, A., Romo-Romo, F., Atin-Arratibel, M. L., Pecos-Martin, D., Gallego-Izquierdo, T., *et al.* (2017). Effectiveness of Nerve Gliding Exercises on Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review. *J Manipulative Physiol Ther*, 40(1), 50-59.
- Basson, A., Olivier, B., Ellis, R., Coppieters, M., Stewart, A., & Mudzi, W. (2017). The Effectiveness of Neural Mobilization for Neuromusculoskeletal Conditions: A

Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 47(9), 593-615.

- Beaton, D. E., Katz, J. N., Fossel, A. H., Wright, J. G., Tarasuk, V., & Bombardier, C. (2001). Measuring the whole or the parts? Validity, reliability, and responsiveness of the Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand outcome measure in different regions of the upper extremity. *Journal of Hand Therapy*, 14(2), 128-146.
- Bennell, K. L., & Hinman, R. S. (2011). A review of the clinical evidence for exercise in osteoarthritis of the hip and knee. *J Sci Med Sport*, 14(1), 4-9.
- Boom, J., & Visser, L. H. (2012). Quantitative assessment of nerve echogenicity: comparison of methods for evaluating nerve echogenicity in ulnar neuropathy at the elbow. *Clin Neurophysiol*, 123(7), 1446-1453.
- Boudier-Reveret, M., Gilbert, K. K., Allegue, D. R., Moussadyk, M., Brismee, J. M., Sizer, P. S., Jr., Feipel, V., *et al.* (2017). Effect of neurodynamic mobilization on fluid dispersion in median nerve at the level of the carpal tunnel: A cadaveric study. *Musculoskelet Sci Pract*, 31, 45-51.
- Breuer, B., Sperber, K., Wallenstein, S., Kiprovski, K., Calapa, A., Snow, B., & Pappagallo, M. (2006). Clinically significant placebo analgesic response in a pilot trial of botulinum B in patients with hand pain and carpal tunnel syndrome. *Pain Med*, 7(1), 16-24.
- Brininger, T., Rogers, J., Holm, M., Baker, N., Li, Z.-M., & Goitz, R. (2007). Efficacy of a fabricated customized splint and tendon and nerve gliding exercises for the treatment of carpal tunnel syndrome: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 88(11), 1429-1435.
- Broderick, J. E., Junghaenel, D. U., & Turk, D. C. (2004). Stability of patient adaptation classifications on the multidimensional pain inventory. *Pain*, 109(1-2), 94-102.
- Brown, K., Loprinzi, P., Brosky, J., & Topp, R. (2014). Prehabilitation influences exercise-related psychological constructs such as self-efficacy and outcome expectations to exercise. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(1), 201-209.
- Burke, J., Buchberger, D. J., Carey-Loghmani, M. T., Dougherty, P. E., Greco, D. S., & Dishman, J. D. (2007). A pilot study comparing two manual therapy interventions for carpal tunnel syndrome. *J Manipulative Physiol Ther*, 30(1), 50-61.
- Collinger, J., Fullerton, B., Impink, B., Koontz, A., & Boninger, M. (2010). Validation of grayscale-based quantitative ultrasound in manual wheelchair users: relationship to established clinical measures of shoulder pathology. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 89(5), 390-400.
- Coppieters, M., & Butler, D. (2008). Do 'sliders' slide and 'tensioners' tension? An analysis of neurodynamic techniques and considerations regarding their application. *Manual Therapy*, 13(3), 213-221.
- Coppieters, M., Hough, A., & Dilley, A. (2009). Different nerve-gliding exercises induce different magnitudes of median nerve longitudinal excursion: an in vivo study using dynamic ultrasound imaging. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 39(3), 164-171.

- Desmeules, F., Hall, J., & Woodhouse, L. (2013). Prehabilitation improves physical function of individuals with severe disability from hip or knee osteoarthritis. *Physiotherapy Canada*, 65(2), 116-124.
- Dilley, A., Greening, J., Lynn, B., Leary, R., & Morris, V. (2001). The use of cross-correlation analysis between high-frequency ultrasound images to measure longitudinal median nerve movement. *Ultrasound in medicine & biology*, 27(9), 1211-1218.
- Durand, M. J., Vachon, B., Hong, Q. N., & Loisel, P. (2005). The cross-cultural adaptation of the DASH questionnaire in Canadian French. *Journal of Hand Therapy*, 18(1), 34-39.
- El Miedany, Y. M., Aty, S. A., & Ashour, S. (2004). Ultrasonography versus nerve conduction study in patients with carpal tunnel syndrome: substantive or complementary tests? *Rheumatology (Oxford)*, 43(7), 887-895.
- Ellis, R., Blyth, R., Arnold, N., & Miner-Williams, W. (2017). Is there a relationship between impaired median nerve excursion and carpal tunnel syndrome? A systematic review. *Journal of Hand Therapy*, 30(1), 3-12.
- Fernandez-de-Las Penas, C., Ortega-Santiago, R., de la Llave-Rincon, A. I., Martinez-Perez, A., Fahandezh-Saddi Diaz, H., Martinez-Martin, J., Pareja, J. A., *et al.* (2015). Manual Physical Therapy Versus Surgery for Carpal Tunnel Syndrome: A Randomized Parallel-Group Trial. *J Pain*, 16(11), 1087-1094.
- Geere, J., Chester, R., Kale, S., & Jerosch Herold, C. (2007). Power grip, pinch grip, manual muscle testing or thenar atrophy - which should be assessed as a motor outcome after carpal tunnel decompression? A systematic review. *BMC musculoskeletal disorders*, 8, 114.
- Greenslade, J. R., Mehta, R. L., Belward, P., & Warwick, D. J. (2004). Dash and Boston questionnaire assessment of carpal tunnel syndrome outcome: what is the responsiveness of an outcome questionnaire? *Journal of hand surgery. British volume*, 29(2), 159-164.
- Gummesson, C., Atroshi, I., & Ekdahl, C. (2003). The disabilities of the arm, shoulder and hand (DASH) outcome questionnaire: longitudinal construct validity and measuring self-rated health change after surgery. *BMC musculoskeletal disorders*, 4, 11-11.
- Heebner, M. L., & Roddey, T. S. (2008). The effects of neural mobilization in addition to standard care in persons with carpal tunnel syndrome from a community hospital. *Journal of Hand Therapy*, 21(3), 229-240.
- Hudak, P. L., Amadio, P. C., & Bombardier, C. (1996). Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) [corrected]. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *American journal of industrial medicine*, 29(6), 602-608.
- Impink, B. G., Gagnon, D., Collinger, J. L., & Boninger, M. L. (2010). Repeatability of ultrasonographic median nerve measures. *Muscle & Nerve*, 41(6), 767-773.
- Ioannidis, J. P., Evans, S. J., Gotzsche, P. C., O'Neill, R. T., Altman, D. G., Schulz, K., Moher, D., *et al.* (2004). Better reporting of harms in randomized trials: an extension of the CONSORT statement. *Ann Intern Med*, 141(10), 781-788.
- Kerns, R. D., Turk, D. C., & Rudy, T. E. (1985). The West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory (WHYMPI). *Pain*, 23(4), 345-356.

- Kim, J., Koh, Y.-D., & Choi, S. (2016). Changes in Clinical Symptoms, Functions, and the Median Nerve Cross-Sectional Area at the Carpal Tunnel Inlet after Open Carpal Tunnel Release. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 8(3), 298-302.
- Laliberté, S., Lamoureux, J., Sullivan, M. J. L., Miller, J.-M., Charron, J., & Bouthillier, D. (2008). French translation of the Multidimensional Pain Inventory: L'inventaire multidimensionnel de la douleur. *Pain research & management*, 13(6), 497-505
- Lee, H., Brekelmans, G. J. F., & Visser, L. H. (2016). Quantitative assessment of nerve echogenicity as an additional tool for evaluation of common fibular neuropathy. *Clin Neurophysiol*, 127(1), 874-879.
- Martinoli, C., Tagliafico, A., Bianchi, S., Bodner, G., Padua, L., Schenone, A., & Graif, M. (2007). Peripheral Nerve Abnormalities. *Ultrasound Clinics*, 2(4), 655 - 667. doi:10.1016/j.cult.2007.11.004
- Mondelli, M., Filippou, G., Gallo, A., & Frediani, B. (2008). Diagnostic utility of ultrasonography versus nerve conduction studies in mild carpal tunnel syndrome. *Arthritis Rheum*, 59(3), 357-366.
- Moran, L., Perez, M., Esteban, A., Bellon, J., Arranz, B., & del Cerro, M. (2009). Sonographic measurement of cross-sectional area of the median nerve in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: correlation with nerve conduction studies. *J Clin Ultrasound*, 37(3), 125-131.
- Nadeau, M. J., Desrochers, A., Lamontagne, M., Lariviere, C., & Gagnon, D. H. (2016). Quantitative ultrasound imaging of Achilles tendon integrity in symptomatic and asymptomatic individuals: reliability and minimal detectable change. *J Foot Ankle Res*, 9, 30.
- Nee, R., & Butler, D. (2006). Management of peripheral neuropathic pain: Integrating neurobiology, neurodynamics, and clinical evidence. *Physical Therapy in Sport*, 7, 36-49. doi:10.1016/j.ptsp.2005.10.002
- Olsson, I., Bunketorp, O., Carlsson, S. G., & Styf, J. (2002). Prediction of outcome in whiplash-associated disorders using West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory. *Clin J Pain*, 18(4), 238-244.
- Oudhoff, J. P., Timmermans, D. R. M., Knol, D. L., Bijnen, A. B., & van der Wal, G. (2007). Waiting for elective general surgery: impact on health related quality of life and psychosocial consequences. *BMC public health*, 7, 164-164.
- Paquette, P., Lamontagne, M., Higgins, J., & Gagnon, D. H. (2015). Repeatability and Minimal Detectable Change in Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging. *Ultrasound in medicine & biology*, 41(7), 2082-2086.
- Pelletier, R., Higgins, J., & Bourbonnais, D. (2015). Addressing Neuroplastic Changes in Distributed Areas of the Nervous System Associated With Chronic Musculoskeletal Disorders. *Physical therapy*, 95(11), 1582-1591.
- Peters, S., Page, M. J., Coppieters, M. W., Ross, M., & Johnston, V. (2016). Rehabilitation following carpal tunnel release. *Cochrane Database of Systematic Reviews*(2).

- Pinar, L., Enhos, A., Ada, S., & Güngör, N. (2005). Can we use nerve gliding exercises in women with carpal tunnel syndrome? *Advances in therapy*, 22(5), 467-475.
- Portney, L. G., & Watkins, M. P. (2009). *Foundations of clinical research: applications to practice*. (3 ed.). Philadelphia: Person Prentice Hall.
- Rooks, D., Huang, J., Bierbaum, B., Bolus, S., Rubano, J., Connolly, C., Alpert, S., *et al.* (2006). Effect of preoperative exercise on measures of functional status in men and women undergoing total hip and knee arthroplasty. *Arthritis and rheumatism*, 55(5), 700-708.
- Rozmaryn, L. M., Dovel, S., Rothman, E. R., Gorman, K., Olvey, K. M., & Bartko, J. J. (1998). Nerve and tendon gliding exercises and the conservative management of carpal tunnel syndrome. *Journal of Hand Therapy*, 11(3), 171-179.
- Schmid, A., Elliott, J., Strudwick, M., Little, M., & Coppieters, M. (2012). Effect of splinting and exercise on intraneural edema of the median nerve in carpal tunnel syndrome--an MRI study to reveal therapeutic mechanisms. *Journal of orthopaedic research*, 30(8), 1343-1350.
- Sucher, B. (2013). Grading severity of carpal tunnel syndrome in electrodiagnostic reports: why grading is recommended. *Muscle & Nerve*, 48(3), 331-333.
- Tagliafico, A., Rubino, M., Autuori, A., Bianchi, S., & Martinoli, C. (2007). Wrist and hand ultrasound. *Semin Musculoskelet Radiol*, 11(2), 95-104.
- Tagliafico, A., Tagliafico, G., & Martinoli, C. (2010). Nerve density: a new parameter to evaluate peripheral nerve pathology on ultrasound. Preliminary study. *Ultrasound in medicine & biology*, 36(10), 1588-1593.
- Tuzuner, S., Ozkaynak, S., Acikbas, C., & Yildirim, A. (2004). Median nerve excursion during endoscopic carpal tunnel release. *Neurosurgery*, 54(5), 1155-1160; discussion 1160-1151.
- Uchiyama, S., Itsubo, T., Nakamura, K., Kato, H., Yasutomi, T., & Momose, T. (2010). Current concepts of carpal tunnel syndrome: pathophysiology, treatment, and evaluation. *J Orthop Sci*, 15(1), 1-13.
- Watanabe, T., Ito, H., Sekine, A., Katano, Y., Nishimura, T., Kato, Y., Takeda, J., *et al.* (2010). Sonographic evaluation of the peripheral nerve in diabetic patients: the relationship between nerve conduction studies, echo intensity, and cross-sectional area. *J Ultrasound Med*, 29(5), 697-708.

Tableau XI. Demographic information of study participants

	Experimental group N=15	Control group N=15	Total Sample N=30
Age – mean (SD)	54.6 (9.9)	53.8 (8.7)	54.2 (9.2)
Gender – women (%)	11 (73.3%)	9 (60.0%)	20 (66.7%)
Body mass index (Kg/m ²) - mean (SD)	30.0 (7.5)	28.3 (4.9)	29.2 (6.3)
Upper limb length (cm) – mean (SD)	100.2 (7.9)	100.1 (6.8)	100.2 (7.2)
Grip strength (Kg) - mean (SD)	4.2 (1.9)	3.9 (1.7)	4.0 (1.8)
Nerve Conduction Study grade at baseline*			
Very mild	2 (13.3%)	0 (0.0%)	2 (6.9%)
Mild	5 (33.3%)	5 (33.3%)	10 (33.3%)
Moderate	6 (40.0%)	8 (53.3%)	14 (46.7%)
Severe	2 (13.3%)	2 (13.3%)	4 (13.3%)

SD = standard deviation. *Grading based on Sucher (2013)

Tableau XII. 6-item participant-feedback questionnaire obtained from participants (n=9) who completed the program

Item	Mean Score (Min-Max)
1. Did you enjoy your experience doing the neuromobilization program?	4.3 (4-5)
2. Did the neuromobilization program improve your condition?	3.5 (3-4)
3. Was the neuromobilization program easy to perform at home?	4.2 (2-5)
4. Was the execution of the neuromobilization program challenging	1.8 (1-4)
5. Did you experience pain or discomfort during the neuromobilization program?	3.3 (1-5)
6. Would you like to repeat the neuromobilization program?	4.2 (3-5)

Tableau XIII. Pilot analysis of the effects of the neuromobilization exercise program

	T0	T1	T2
Median nerve cross-sectional area (mm²)			
Experimental	14.23 ± 4.83	15.17 ± 5.19	15.17 ± 5.10
Control	14.07 ± 3.70	14.96 ± 2.82	13.95 ± 3.68
Median nerve mean echogenicity			
Experimental	57.69 ± 13.20	52.19 ± 7.21	58.55 ± 11.38
Control	49.52 ± 11.94	50.50 ± 8.81	47.74 ± 12.09
Median nerve longitudinal excursion (mm; technique 1: wrist extension only)			
Experimental	7.24 ± 2.62	7.62 ± 3.15	7.97 ± 3.41
Control	7.77 ± 2.85	8.41 ± 2.60	8.04 ± 2.64
Median nerve longitudinal excursion (mm; technique 2: wrist extension combined with ipsilateral neck side flexion)			
Experimental	6.96 ± 2.51	7.44 ± 1.87	7.73 ± 3.03
Control	7.42 ± 2.82	8.53 ± 2.43	7.92 ± 2.62
Tip pinch strength (kg)			
Experimental	4.24 ± 1.98	3.80 ± 1.49	3.00 ± 1.38
Control	3.89 ± 1.71	3.68 ± 2.07	3.35 ± 1.64
WHYMPI - Pain Interference			
Experimental	2.45 ± 1.31	2.09 ± 1.33	1.50 ± 1.12
Control	1.86 ± 1.18	2.09 ± 1.33	1.89 ± 1.14
WHYMPI - Pain Severity			
Experimental	3.01 ± 1.10	2.84 ± 1.41	1.93 ± 1.47
Control	3.20 ± 1.33	3.14 ± 1.43	2.34 ± 1.43
DASH			
Experimental	36.07 ± 19.23	37.56 ± 16.97	33.81 ± 19.54
Control	35.32 ± 18.97	37.07 ± 17.72	31.50 ± 14.52

Data presented as mean and standard deviation. Statistically significant results are highlighted in bolded character. Legends: ES = effect size; Exp = experimental; Ctrl = control; WHYMPI = West Haven-Yale multidimensional pain inventory; DASH = Disability of the arm, shoulder and hand.

5.4.10. Figure Legends

- Figure 26. Handout of the neuromobilization exercise program given to participant allocated to the experimental group. Each following exercise of the week of the program was design to include progressions by incorporating movements that required a greater range of nerve excursion and were implemented weekly according to participant's response.
- Figure 27. a) Ultrasound images of the median nerve at the distal forearm were three regions of interest (ROIs; see blue boxes) are manually selected alongside the nerve. Note that the smaller yellow boxes indicate the center coordinates of each ROI.
- b) Cross-correlation algorithm output presenting the mean excursion of the nerve. Note that the software breaks the dynamic recording in multiple still frames (usually around 200 frames) depending on the duration of acquisition. The excursion is calculated from the mean hypotenuse of the horizontal and vertical excursion of each ROI. A positive result indicates that the direction occurred to the right of the image, in this case indicating a distal excursion.
- Figure 28. CONSORT Flow chart summary of enrollment, screening, allocation, follow-up, and analysis for the study.
- Figure 29. Efficacy outcomes measures presenting the analysis of variance between experimental and control groups at the different assessment times (2 groups X 3 times).

Figure 26

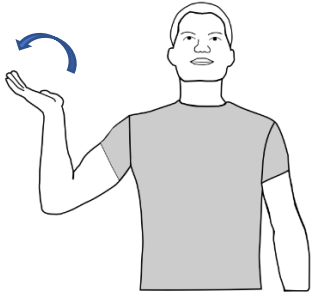
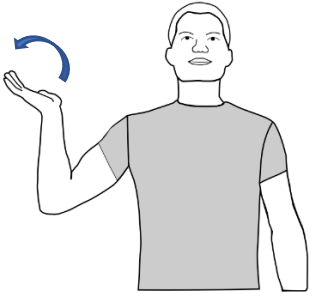
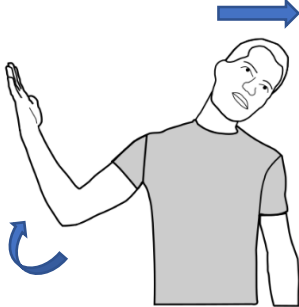
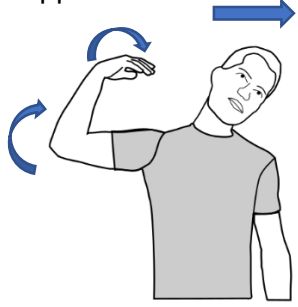
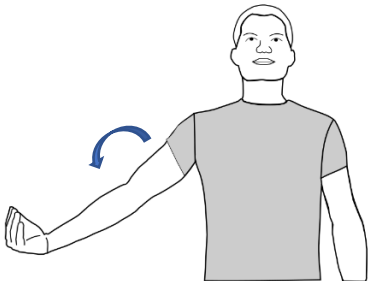
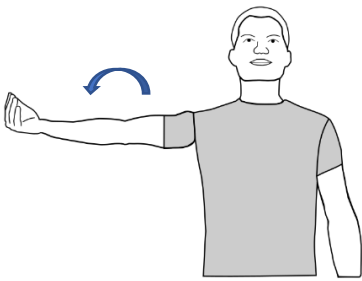
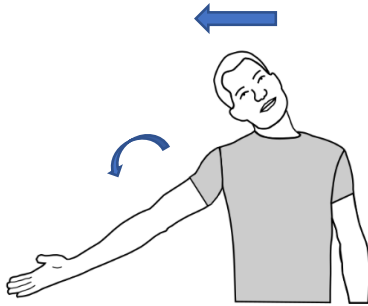
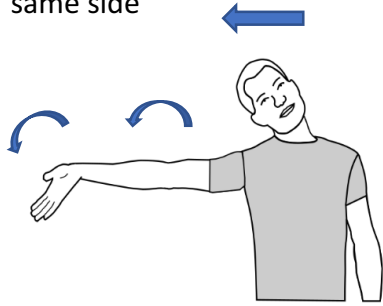
WEEK 1	WEEK 2	WEEK 3	WEEK 4
<p>Starting position: Hold the wrist extended and the elbow flexed</p> 	<p>Starting position: Hold the wrist extended and your elbow flexed</p> 	<p>Starting position: Hold the elbow flexed and the head inclined to the opposite side</p> 	<p>Starting position: Hold the wrist and elbow flexed and your head inclined to the opposite side</p> 
<p>Final position: Extend the elbow completely while folding the wrist</p> 	<p>Final position: Extend the elbow completely while folding the wrist and elevating the shoulder</p> 	<p>Final position: Extend your elbow completely while moving the head toward the same side</p> 	<p>Final position: Extend the wrist and the elbow completely while moving the head toward the same side</p> 

Figure 27

Analysis of median nerve neurodynamics

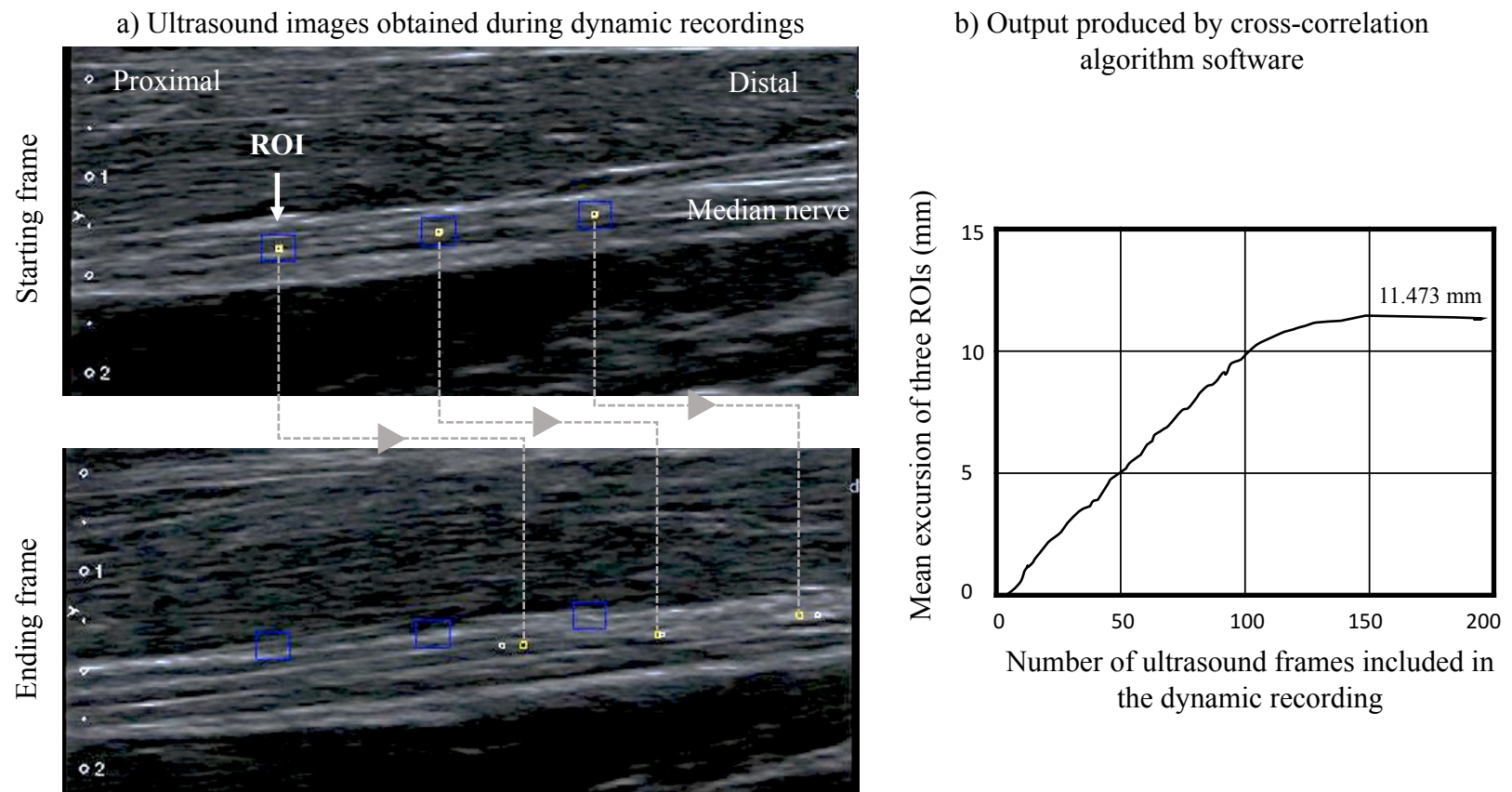


Figure 28

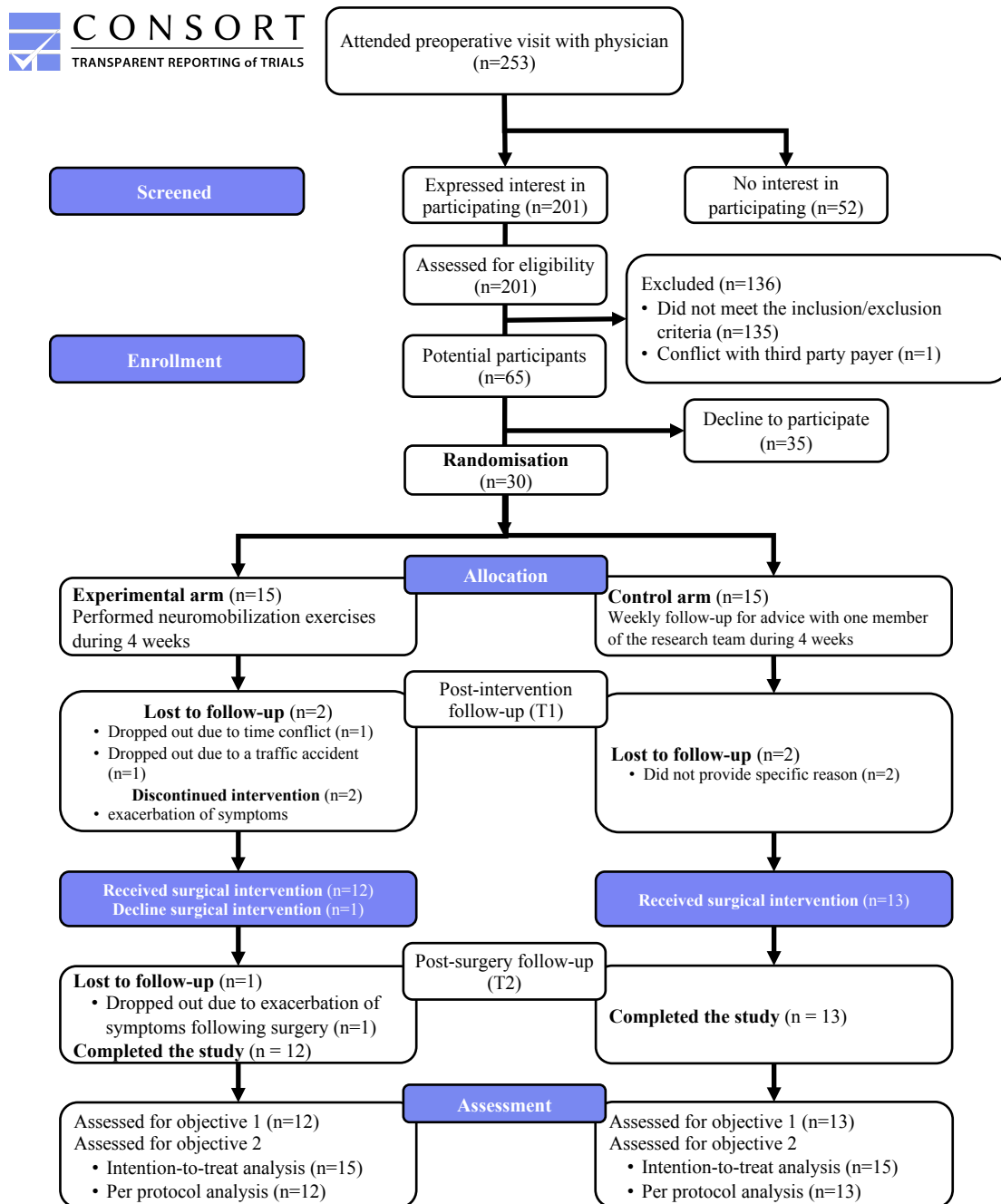
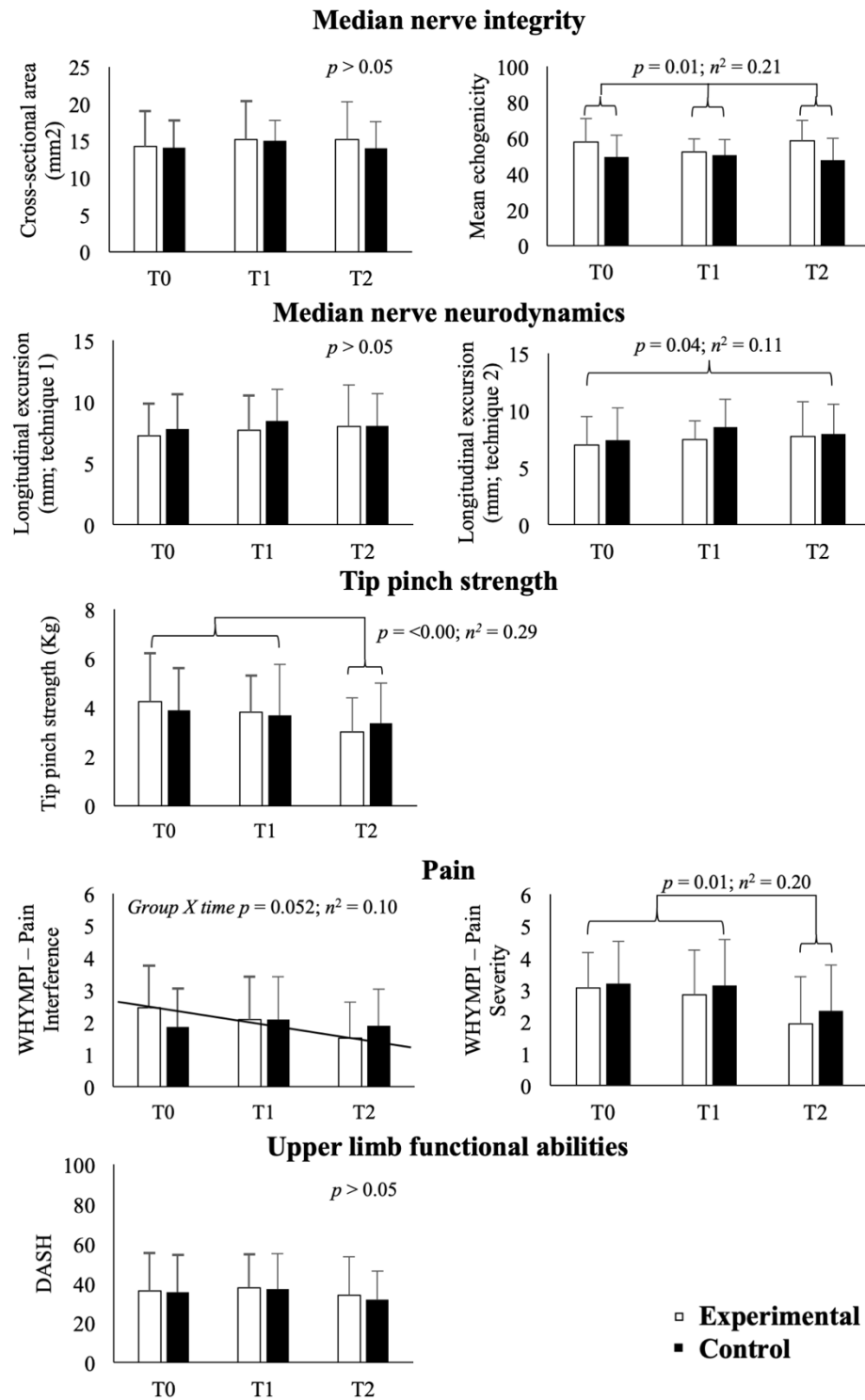


Figure 29



6. DISCUSSION

Les exercices neurodynamiques sont fréquemment recommandés par les physiothérapeutes auprès des individus qui les consultent en lien avec des symptômes reliés au STC bien que le niveau d'évidence qui supporte leur efficacité demeure faible. L'une des principales lacunes des études antérieures était en lien avec l'absence de mesures objectives robustes des effets des mobilisations neurodynamiques sur les déficiences associées au STC. En conséquence, les mécanismes thérapeutiques qui sous-tendent l'efficacité des mobilisations neurodynamiques demeurent largement inconnus. Dans cette optique, l'objectif principal de cette thèse visait à quantifier les effets d'un programme d'exercices fondé sur les mobilisations neurodynamiques offerts à des individus atteints du STC, sur l'intégrité biologique et les propriétés biomécanique du nerf médian ainsi que sur l'excitabilité cortico-spinale à l'aide de protocoles d'évaluation impliquant l'imagerie quantitative par ultrasonographie la stimulation magnétique transcrânienne, respectivement. Les travaux de cette thèse comblent certaines lacunes des études antérieures par l'apport de nouvelles connaissances sur les qualités psychométriques des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian; les mécanismes; et la faisabilité et l'efficacité des exercices neurodynamiques.

Une discussion détaillée des résultats en lien avec les travaux de cette thèse a été présentée à l'intérieur des articles scientifiques qui constituent cette thèse (voir chapitre 5). Par conséquent, une discussion succincte des principaux constats des travaux de recherche sera présentée dans ce chapitre. Dans les sections suivantes, les limites respectives de chaque projet, les implications pour la pratique clinique ainsi que les avenues de recherche future seront abordées.

6.1. Synthèse des constats des travaux de recherche

6.1.1. Qualités psychométriques des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian

Alors que l'excursion du nerf médian serait limitée chez les individus atteints du STC (R. Ellis *et al.*, 2017), un intérêt croissant se développe pour caractériser les propriétés biomécaniques du nerf médian. L'imagerie quantitative par ultrasonographie appert pertinente en raison des possibilités d'évaluation statique, mais surtout dynamique. Toutefois, les mesures d'excursion du nerf médian à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie n'ont pas fait l'objet d'études approfondies.

6.1.1.1. Fidélité et changement minimal détectable

Le premier objectif de cette thèse visait à déterminer s'il était possible d'obtenir des mesures fidèles et précises de l'excursion longitudinale du nerf médian à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie chez une population mixte, incluant des individus asymptomatiques et des individus atteints du STC (Article n°1). En utilisant l'étude G dérivée de la théorie de la généralisabilité, les sources d'erreur de mesure ont été explorées en déterminant l'impact et l'interaction des différences interindividuelles, la prise d'image et les visites. Les résultats confirment qu'une large proportion (67,15 % à 76,23 %) de la variance totale des mesures est attribuée aux différences interindividuelles de nos participants, ce qui témoigne de la robustesse de notre protocole d'évaluation. Toutefois, une source d'erreur considérable (11,07 % - 31,67 %) est attribuée à l'interaction entre les participants et les visites, ce qui suggère que les participants ont pu réagir différemment entre les deux périodes d'évaluation. À cet effet, il a été observé que la commande de mouvement actif en inclinaison latérale du cou était difficile pour certains participants, ce qui explique en partie ce résultat. Afin de réduire les risques d'erreur associés au mouvement actif du cou, la composante de mouvement actif a été exclue des projets subséquents alors qu'un assistant de recherche était responsable d'induire passivement une inclinaison cervicale lors des manœuvres d'évaluation.

L'étude D de la théorie de la généralisabilité a permis d'évaluer l'impact de plusieurs scénarios sur la fidélité et la précision des mesures d'excursion longitudinales du nerf médian.

L'analyse de ces résultats révèle que les mesures d'excursion ont une bonne fidélité ($\phi=0.84$) et une bonne précision (ESM=14.6%; CMD) lors de manœuvres de glissement réalisées à 45° d'abduction de l'épaule lorsqu'au moins trois images sont acquises durant une visite. La manœuvre de glissement à 45° d'abduction de l'épaule s'est révélée systématiquement supérieure aux autres manœuvres à l'essai. De plus, l'ajout d'une seconde visite d'évaluation améliore la fidélité (+12%) et la précision (CMD -29%) de la mesure et constitue un protocole réaliste pour de futurs devis de recherches.

Depuis la publication de nos résultats, une revue systématique portant sur la fidélité des mesures d'excursion, incluant l'évaluation dans le plan longitudinale et transverse, de nerfs périphériques à l'aide de l'imagerie par ultrasonographie a été publiée (Kasehagen, Ellis *et al.*, 2018). Les auteurs de cette revue concluent à un niveau d'évidence élevé, ou « *strong* », de fidélité modérée à excellente lorsque l'imagerie par ultrasonographie est employée pour mesurer l'excursion de nerfs périphériques. Les résultats de notre étude ont contribué à enrichir le contenu de cette revue en étant la seule à rapporter des données sur la fidélité test-retest de l'excursion du nerf médian ainsi que des données provenant d'un échantillon mixte de la population. D'autres études réalisées au membre inférieur ont également rapporté des mesures de fidélité test-retest avec des résultats comparables, bien que légèrement supérieurs aux nôtres. Ridehalgh et al. (2012), ont rapporté une excellente fidélité test-retest ($ICC > 0,92$; 95% IC = 0,79– 0,97) et une excellente précision ($CMD_{absolu} < 2,03$ mm; $CMD_{relatif} < 16$ %) de l'excursion du nerf sciatique évalué à deux positions différentes de flexion de la hanche. Carroll et al. (2012) ont rapporté une excellente fidélité test-retest ($ICC = 0,93$; 95% IC = 0,70 – 0,96) et une précision adéquate ($CMD_{absolu} = 0,66$ mm – 0,84 mm; $CMD_{relatif} = 22$ % - 27 %) des mesures de l'excursion du nerf tibial. Les constats de notre première étude, appuyés par les conclusions de cette revue systématique, attestent que l'imagerie quantitative par ultrasonographie représente un outil prometteur pour évaluer l'excursion de nerf périphérique.

6.1.1.2. Validité convergente

Le deuxième objectif de cette thèse visait à vérifier la concordance entre les mesures d'excursion longitudinale d'un modèle fantôme de nerf médian obtenues à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie et un système tridimensionnel d'analyse de mouvement

(Article n°2). Nos résultats démontrent que les mesures d'excursion longitudinale du modèle artificiel de nerf médian sont presque identiques aux mesures acquises par le système d'analyse du mouvement, c.-à-d. que la différence entre les deux mesures (Δ absolue = 0,85 mm; relative = 7,48 %) est inférieure au changement minimal détectable (CMD = 0,95 mm) rapporté dans notre étude précédente. Toutefois, ces résultats devraient être interprétés prudemment pour deux raisons. Premièrement, l'écart entre les deux systèmes de mesures est plus important lorsque des déplacements supérieurs à 10 mm sont testés. Il semble que l'imagerie quantitative par ultrasonographie pourrait sous-estimer le déplacement longitudinal du modèle artificiel de nerf médian par rapport aux mesures obtenues par le système d'analyse du mouvement. Toutefois, il importe de préciser que peu d'études ont rapporté des mesures d'excursion de nerf périphérique supérieures à 10 mm (voir tableau II). En outre, les mesures moyennes d'excursion obtenues durant les deux études cliniques subséquentes de cette thèse sont inférieures à ce seuil. Deuxièmement, la différence entre les caractéristiques mécaniques intrinsèques, notamment l'élasticité d'un nerf biologique par rapport à celle du modèle artificiel ici, une tige de polymère thermoplastique (acrylonitrile butadiène styrène), pourrait avoir influencé les résultats. Cette avenue a été explorée par une analyse de la corrélation entre la différence des mesures d'excursion calculées par les deux systèmes de mesures et la vitesse d'excursion du modèle fantôme calculée par le système d'imagerie par ultrasonographie. Or, la vitesse de déplacement est négativement et faiblement corrélée ($r = 0,51$) avec la différence des mesures d'excursion du modèle artificiel du nerf médian. En fait, l'analyse de la corrélation indique que la différence d'excursion mesurée par les deux systèmes tend à augmenter légèrement à mesure que la vitesse augmente. Aussi, ces résultats suggèrent que l'évaluation d'une structure, par exemple un nerf biologique, ayant un potentiel d'élasticité supérieure se traduisant par une vitesse moins élevée, n'aurait qu'un impact minime sur la concordance entre les mesures d'excursion. Ainsi, les constats de notre deuxième étude supportent la pertinence de l'imagerie quantitative par ultrasonographie pour mesurer l'excursion longitudinale du nerf médian.

6.1.2. Effet d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offert à des individus atteints du STC

L'efficacité des exercices neurodynamiques demeure controversée en raison d'un faible niveau d'évidence actuellement disponible dans la littérature. Parmi les lacunes des études antérieures, on relève l'absence de mesures objectives des effets des exercices sur l'intégrité et les propriétés biomécanique du nerf médian au poignet (*effets périphériques*) et sur la structure et de la fonction des aires corticales motrices (*effets centraux*). Aussi, bien que quelques études cliniques plus récentes aient adopté des devis méthodologiques plus rigoureux, c.-à-d., présence d'un groupe contrôle, allocation randomisée, très peu ont rigoureusement rapporté la faisabilité et la sécurité des exercices neurodynamiques. Par conséquent, des évidences additionnelles étaient nécessaires pour quantifier les effets d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques.

6.1.2.1. Exploration des adaptations périphériques et centrales suivant un programme d'exercices neurodynamiques à domicile

Le troisième objectif de cette thèse visait à explorer les adaptations périphériques et centrales du nerf médian suivant un programme d'exercices neurodynamiques sur l'intégrité biologique, les propriétés biomécaniques du nerf médian et l'excitabilité corticospinale (cf. Article n°3). Nos résultats suggèrent que les individus atteints du STC puissent bénéficier des exercices neurodynamiques. Spécifiquement, six de nos 14 participants à l'étude ont rapporté une amélioration cliniquement significative de la douleur et de la fonction du membre supérieur. Ces résultats concordent avec ceux d'une étude précédente qui rapporte que des individus atteints du STC ressentent moins de douleur et ont une meilleure capacité fonctionnelle après avoir complété des exercices neurodynamiques comme seule intervention (Tal Akabi & Rushton, 2000). De plus, le changement moyen sur l'échelle de fonction du membre supérieur (DASH) observé dans notre étude est supérieur à celui rapporté par l'étude Bialosky, et al. (2009) qui rapportait également que les individus atteints du STC ressentent moins de douleur suivant six sessions de traitements fondés sur les mobilisations neurales. Ces résultats soutiennent que des changements cliniques ont été observés chez nos participants et valident

notre démarche exploratoire visant à expliquer ses changements par des adaptations périphériques et centrales.

Nos résultats suggèrent que de compléter le programme d'exercices neurodynamiques ne mène à aucun changement sur l'intégrité du nerf médian et de l'excursion du nerf médian. À l'inverse, le programme d'exercices neurodynamiques entraîne une augmentation des coefficients des pentes stimulus-réponse. Un coefficient plus élevé indique une augmentation de l'excitabilité corticospinale qui pourrait être attribuable à l'effet du programme d'exercice. La répétition de mouvements avec une complexité croissante ainsi que l'apport de rétroaction sont deux facteurs qui stimulent les adaptations au niveau du cortex moteur. Des résultats similaires sont rapportés dans une revue de la littérature auprès d'individus ayant une déficience motrice à la suite d'un accident vasculocérébral ayant complété des exercices de réadaptation ciblant le membre supérieur et chez qui l'amélioration de la capacité fonctionnelle est associée à des changements au niveau du cortex moteur, incluant une augmentation de l'excitabilité corticospinale. Ces résultats sont, jusqu'à un certain point, généralisables aux individus atteints du STC et soutiennent que la présence de réorganisation corticale, particulièrement au niveau du cortex moteur, est un mécanisme d'adaptation déclenché par les exercices neurodynamiques.

Alors que des évidences émergentes remettent en cause l'effet mécanique à moyen et long terme de la plupart des interventions manuelles en physiothérapie, telles les mobilisations et manipulations articulaires (Bialosky, Bishop, Price, Robinson, & George, 2009), les cliniciens et les scientifiques s'affairent maintenant à explorer d'autres avenues pour expliquer les bénéfices cliniques observés chez leurs clients ou patients (Fernandez-de-Las-Penas, Cleland *et al.*, 2013; Pelletier, Higgins, & Bourbonnais, 2015). Nos résultats supportent ces évidences alors qu'aucune adaptation périphérique n'a été observée suite au programme d'exercices neurodynamiques. En parallèle, un intérêt croissant s'est développé pour caractériser les effets neurophysiologiques des interventions en réadaptation. Une adaptation au niveau du cortex moteur primaire, ainsi qu'aux autres aires corticales sensorimotrices, représente un exemple de ces mécanismes neurophysiologiques potentiellement impliqués chez les individus atteints du STC et qui pourraient prédire l'évolution clinique des individus. En contrepartie, l'absence d'adaptation, voire une *mésadaptation*, pourrait expliquer la chronicité des symptômes et l'échec thérapeutiques chez certains individus.

6.1.2.2. Faisabilité et efficacité d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offerts aux individus atteints du STC en attente d'une chirurgie de décompression

Le quatrième objectif de cette thèse visait à évaluer la faisabilité d'un programme d'exercices neurodynamiques préopératoire exécuté par des individus atteints du STC en attente d'une première chirurgie et évaluer l'efficacité de ce programme chez ces mêmes individus pour améliorer l'intégrité biologique, les propriétés biomécaniques du nerf médian; réduire la douleur, les déficiences sensorimotrices et optimiser la capacité fonctionnelle du membre supérieur en comparaison à un groupe contrôle ne complétant aucun programme d'exercice avant et après la chirurgie de décompression du tunnel carpien (cf. Article n°4). Les résultats obtenus dans le cadre d'un essai clinique randomisé pilote attestent de la faisabilité d'offrir un programme d'exercice à domicile fondé sur les exercices neurodynamiques à des individus atteints du STC dans un contexte de soins, notamment dans l'attente d'une chirurgie de décompression. Le taux d'attrition observé dans le groupe expérimental à la fin de l'étude (3/15 = 20 %) est comparable avec les taux (12,5 % - 25 %) rapportés par d'autres études expérimentales réalisées auprès d'individus atteints du STC. Le nombre de pertes au suivi dans chaque groupe (expérimental n=3; contrôle n=2) était associé à des circonstances indépendantes au projet de recherche. L'adhérence élevée et la satisfaction exprimée par les participants envers le programme fondé sur les exercices neurodynamiques appuient la pertinence de ce programme qui ne nécessite aucun équipement spécialisé et qui peut facilement s'intégrer dans la routine des activités quotidiennes.

Les cliniciens sont généralement bien conscients des effets adverses potentiels des exercices neurodynamiques. Toutefois, la littérature sur le sujet est limitée telle que rapportée dans une revue systématique (2012) qui expose des lacunes substantielles dans la divulgation des effets adverses des études portant sur cette thématique auprès d'individus atteints du STC (Page *et al.*, 2012). Bien qu'il soit probable que cette absence de données reflète le caractère exceptionnel de réactions adverses aux exercices neurodynamiques, il était éthiquement et moralement nécessaire de documenter leur sécurité. Durant ce projet, deux participants ont rapporté des effets adverses incluant : 1) l'augmentation des douleurs et des paresthésies et 2) l'exacerbation de douleur cervicale. Ces symptômes ont nécessité l'arrêt des exercices dans le

premier cas et l'ajustement des paramètres d'exercices dans le second. Les symptômes de ces participants s'étaient significativement améliorés avant la fin de l'étude grâce à des conseils de la part de l'équipe de recherche. Enfin, l'absence d'effet adverse majeur, défini par la persistance de symptômes sévères et incapacitants et le recours à des soins spécialisés supplémentaires confirme notre hypothèse que notre programme d'exercices neurodynamiques, inspiré des techniques de glissement, est relativement sécuritaire.

Les résultats de ce projet n'ont pas permis de conclure à la supériorité du programme d'exercices neurodynamique comparativement à aucune intervention chez des individus atteints du STC pour améliorer l'intégrité et l'excursion du nerf médian, la force musculaire de pince et la douleur ainsi que les capacités fonctionnelles du membre supérieur immédiatement avant, mais également un mois après une chirurgie de décompression. Toutefois, nous avons observé des différences statistiquement significatives pour certaines de nos mesures à l'étude. D'abord, la valeur moyenne d'échogénicité du nerf médian était statistiquement plus élevée chez le groupe expérimental. Soulignons que la différence entre les mesures initiales des deux groupes ($\Delta \leq 15,2 \%$) était inférieure au CMD rapporté précédemment lorsque l'image est acquise à l'entrée du tunnel carpien (CMD = 32,5 %) (Impink *et al.*, 2010). Des valeurs d'échogénicité inférieure sur une échelle de niveaux de gris (c.-à-d., qui tendent vers zéro) sont associées à la présence d'inflammation ou d'accumulation de fluides telle qu'observée dans les tendinopathies (Collinger *et al.*, 2010). Inversement, un changement de l'échogénicité à la hausse pourrait représenter les premiers signes d'amélioration du flux sanguin intraneural. Les résultats d'une étude antérieure rapportent justement avoir observé une réduction de l'œdème intraneural du nerf médian chez leurs participants atteints du STC qui avaient complété un programme d'exercices neurodynamique de trois semaines (A. Schmid *et al.*, 2012). Ensuite, l'analyse descriptive des données montre que l'amplitude d'excursion tend à augmenter suivant la première évaluation. L'analyse statistique des données a révélé une différence significative attribuée au temps pour les mesures d'excursion obtenues avec la technique 2 (similaire à celle testée dans le cadre de l'article n°1), toutefois la puissance statistique était insuffisante pour préciser si la différence se situe entre l'évaluation initiale et la fin du programme d'exercice ou un mois suivant la chirurgie. De plus, les différences entre les amplitudes d'excursion ($\Delta \leq 7.0 \%$) sont en deçà du CMD rapporté précédemment (CMD = 34,1 %). Ces résultats préliminaires

s'ajoutent à ceux de l'étude précédente et suggèrent que les exercices neurodynamiques n'ont peu, voire aucun, effet sur les mesures d'intégrité et d'excursion du nerf médian.

En ce qui concerne la force de préhension en pince, une réduction attendue de la capacité musculaire des muscles de la loge thénarienne a été observée après la chirurgie de décompression. Puisqu'aucune différence entre les groupes n'a été observée, la diminution de la force, probablement attribuable à la chirurgie selon ce qui est bien documenté, alors qu'un programme d'exercices n'a vraisemblablement aucun effet à court terme (Jo Geere, Chester, Kale, & Jerosch Herold, 2007). Durant ce projet, d'autres mesures des déficiences sensorimotrices ont été colligées, incluant des mesures de seuil de sensibilité tactile, de discrimination deux-points, ainsi que des tests cliniques utilisés dans l'évaluation clinique du STC (tests de Tinel et de Phalen). Ces résultats ont tous été analysés (Annexe III), mais n'ont pu être intégrés dans la version finale du manuscrit soumis pour publication en raison de la limite de mots imposée par la revue choisie. Toutefois, l'analyse des données n'a révélé aucune différence significative et donc, n'altère aucunement les conclusions principales de cette étude.

Enfin, les deux groupes ont signalé une diminution significative importante de la sévérité de la douleur, tandis que l'interférence de la douleur ou les capacités fonctionnelles du membre supérieur ont peu changé. Toutefois, la diminution de la douleur n'est pas un effet immédiat du programme d'exercices et n'a pas été potentialisée par ce dernier. En fait, la diminution de la douleur peut être attribuée principalement à la chirurgie dans les deux groupes. À notre connaissance, la comparaison de nos résultats est limitée à une seule étude n'ayant examiné les effets de mobilisations neurales comparativement à aucune intervention (Tal Akabi & Rushton, 2000). Tal-Akabi et Rushton ont rapporté que les individus qui avaient reçu des mobilisations neurodynamiques passives sur une période de trois semaines rapportaient une amélioration de la douleur et la capacité fonctionnelle de la main. Toutefois, cette étude comporte une taille d'échantillon très limitée, c'est-à-dire $n = 7$ participants par groupe, et l'étendue de l'intervalle de confiance de 95 % pour la mesure de douleur inclut le zéro. En sommes, l'efficacité à court terme des mobilisations neurodynamiques offertes aux individus atteints du STC reste controversée.

6.2. Limites des projets de recherche

Malgré les efforts et la rigueur consacrés au développement des différents projets, certaines limites inhérentes à l'échantillon de la population testée, au choix des outils de mesures et aux traitements de données des projets doivent être considérées.

6.2.1. Limites reliées à l'échantillon de la population

La taille d'échantillon relativement faible des différents projets de cette thèse doit être prise en considération lors de l'interprétation des résultats. En effet, les petites tailles d'échantillons prévues dans les différents projets étaient, en partie, justifiées par le financement limité et le caractère restrictif des critères d'inclusions et d'exclusions, comme soulevé dans l'article n°4. Cette petite taille d'échantillonnage pourrait avoir contribué à limiter la variance entre les individus atteints du STC et les individus asymptomatiques et ainsi influencer la fidélité et la précision des mesures d'excursion longitudinale du nerf média obtenues avec l'imagerie quantitative par ultrasonographie (Article n°1) ; limiter la généralisation de nos conclusions concernant les effets préférentiellement centraux observés chez les individus atteints du STC ayant complété le programme d'exercice (Article n°3); limiter les effets significatifs entre les groupes et les temps d'évaluation de l'étude, particulièrement pour les mesures d'interférence de douleur et de capacité fonctionnelle du membre supérieur (Article n°4).

6.2.2. Limites reliées aux outils de mesures et aux traitements des données

Les systèmes d'imagerie par ultrasonographie sont considérés comme des outils de pointes et de grande précision. Dans le cadre de cette thèse, les trois premiers projets ont été réalisés avec un appareil HD11 XE (Philips) alors que le dernier projet a été réalisé avec un appareil Aplio (Toshiba). Il est intéressant de constater que les amplitudes d'excursion longitudinale du nerf médian sont supérieures dans le dernier projet, alors que le même protocole d'acquisition et de traitement de données a été utilisé. Par exemple, les mesures moyennes notées lors du premier projet varient entre 4,06 mm et 4,41 mm, alors que celles obtenues lors du dernier projet varient entre 6,96 mm et 8,53 mm. La différence entre la valeur moyenne minimale du premier projet et la valeur maximale du dernier projet est de 36 %, ce qui dépasse

le seuil du CMD (34,1 %) préalablement établi pour cette mesure. Cette différence peut être attribuée à des erreurs techniques, mais également à des variations intrinsèques entre les systèmes d'imagerie par ultrasonographie de compagnies différentes. Cet élément devra être considéré si les résultats de ces études sont utilisés à titre comparatif.

Le traitement des données d'excursion du nerf s'avère parfois compliqué. Il arrive que le nerf médian soit bien visualisé au début de la séquence vidéo, mais se déplace hors du champ de vision de la sonde avant la fin de la séquence, compromettant ainsi l'analyse de l'excursion complète de ce dernier. Heureusement, ce phénomène pouvait être détecté lors de la collecte par l'évaluateur qui alors répétait simplement la séquence. Si le nerf n'était toujours pas adéquatement visualisé, la séquence était exclue de l'analyse finale et remplacée en utilisant des imputations multiples. À titre d'exemple, durant le dernier projet, 4 % des mesures d'excursion du nerf originales ont été exclues. Aussi, afin d'assurer une constance entre les projets, toutes les analyses d'excursion ont été réalisées par le même évaluateur.

Également, l'acquisition et le traitement des signaux des potentiels moteurs évoqués pour les protocoles de stimulations paires a comporté quelques difficultés. Les amplitudes de potentiels enregistrés lors de ces protocoles sont plus faibles que les réponses obtenues avec la courbe de recrutement. Par conséquent, il était fréquent qu'aucun potentiel ne soit décelé. Des stratégies méthodologiques sont disponibles dans la littérature pour pallier ce problème incluant l'utilisation de la moyenne de cinq à quinze essais, entrecoupés de stimulations simples pour permettre un *wash-out* du conditionnement (Rossini *et al.*, 2015). Malheureusement, plusieurs signaux étaient de mauvaises qualités, si bien que ces données n'ont pas été retenues dans l'analyse finale.

6.3. Implications pour la pratique clinique

Les physiothérapeutes disposent de peu d'information pour les guider dans l'évaluation des propriétés biomécaniques des nerfs périphériques ainsi que la prescription d'exercices visant à améliorer les déficiences potentielles de leur patient.

Évaluation des propriétés biomécaniques du nerf médian :

Cette thèse ne permet malheureusement pas de transférer directement l'expertise développée durant ces travaux vers la clinique, notamment en raison de l'accessibilité aux systèmes d'imagerie par ultrasonographie et aux logiciels de traitement de données. Quelques informations pertinentes à la pratique clinique peuvent toutefois être considérées :

1. Dans une manœuvre neurodynamique alors que l'individu testé repose en décubitus dorsal, avec l'épaule à 45° d'abduction, le coude étendu et l'avant-bras en supination, l'extension passive complète du poignet entraîne un déplacement distal du nerf médian sur une distance moyenne variant entre 4 mm et 8,5 mm.
2. Durant cette manœuvre, il a été observé que l'inclinaison ipsilatérale ou contralatérale cervicale induisait un léger déplacement du nerf médian au poignet visualisé par ultrasonographie. Autrement dit, les mouvements d'articulations à distance de la région testée influencent un nerf périphérique (ici le nerf médian) dans son ensemble. Cette observation valide, jusqu'à un certain point, la pertinence de manœuvres de différenciation pour évaluer l'irritabilité d'un nerf périphérique spécifique dans un contexte d'évaluation clinique.
3. La sécurité des interventions fondées sur les mobilisations neurodynamiques est un enjeu important pour les cliniciens. Des réserves ont d'ailleurs été émises, appuyées du fait qu'une élongation de plus 11 % du nerf réduit considérablement la circulation intraneurale (Shacklock, 2005b). Nos résultats démontrent que les exercices neurodynamiques, inspirés des techniques de glissement sont sécuritaires, bien qu'ils pourraient exacerber des symptômes du STC ou des douleurs musculosquelettiques préalables (p. ex., cervicalgie). À cet effet, les cliniciens devraient porter une attention particulière aux individus atteints du STC en attente d'une chirurgie de décompression qui risque de présenter des symptômes plus sévères.

6.4. Avenues de recherche future

La recherche sur la thématique des exercices neurodynamiques est en émergence comme le témoigne le nombre de publications annuelles trouvées avec le mot-clé « neurodynamique » sur Pubmed qui est passé de 10 à 40 entre 2008 et 2018. L'expansion de cette thématique de

recherche offre beaucoup d'avenues pour de nouvelles recherches. Dans cette optique, les différents travaux de cette thèse ont permis d'établir des pistes à poursuivre.

6.4.1. Court terme

Il sera pertinent d'établir s'il y a une association entre les mesures de déficiences du nerf médian et les mesures autorapportées de douleur et de capacité fonctionnelle du membre supérieur afin de potentiellement prédire quels individus bénéficieraient d'exercices neurodynamiques. Ceci permettrait de mieux comprendre la relation entre les déficiences structurelles ou physiologiques et la douleur chez cette population. Cette relation pourrait être quantifiée dans le cadre d'une étude rétrospective utilisant les données communes colligées dans les différents projets de cette thèse ayant ciblé les individus atteints du STC.

L'évaluation de l'excursion du nerf médian par l'imagerie par ultrasonographie demeure en émergence. Les études antérieures diffèrent grandement sur le plan méthodologique, par exemple : investigation de différents segments de nerfs périphériques, position des participants lors des évaluations, position et mouvement des segments corporels pour promouvoir l'excursion du nerf. L'hétérogénéité de ces méthodes rend la comparaison des résultats entre les études problématiques, et ce sans aborder les variations attribuables aux systèmes d'imagerie par ultrasonographie et au logiciel de traitement de données. Il est donc nécessaire d'accroître la cohérence dans la collecte des données des études futures afin de renforcer le niveau de preuve de l'évaluation de l'excursion de nerf périphérique par l'imagerie par ultrasonographie.

6.4.2. Moyen et long termes

6.4.2.1. Études comparatives

Les propriétés mécaniques d'un nerf périphérique *ex vivo* sont différentes alors que le nerf oppose moins de résistance à la déformation (Topp & Boyd, 2006). L'évaluation de différents protocoles incluant, par exemple, différentes vitesses de mobilisation ou différentes combinaisons de mouvements fournirait des données intéressantes dans le cadre du développement de thérapies fondées sur les exercices neurodynamiques. En outre, l'évolution de la technologie permet aujourd'hui l'analyse par ultrasonographie de structures en 3D. Le développement de ces technologies, incluant les applications potentielles du 4D (incluant la

mesure du temps et du déplacement), apparaît prometteur et pourrait améliorer la fidélité et la validité des mesures d'excursion de nerfs périphériques.

6.4.2.2. Études randomisées

Considérant les résultats équivoques de nos études cliniques de l'efficacité des exercices neurodynamiques sur la douleur et les mesures d'intégrité biologique du nerf médian, il apparaît pertinent de poursuivre les efforts de recherche. À cet effet, il serait pertinent de conduire un essai clinique randomisé de grande envergure afin de renforcer le niveau de preuve. Un calcul de la taille d'échantillonnage pourra être réalisé à partir des données de nos essais cliniques. En estimant une taille d'effet moyenne ($d = 0,5$) pour une mesure de résultat comme l'échelle DASH avec une puissance statistique de 80 % et un seuil significatif à 5 %, il est nécessaire que 64 individus par groupe complètent le projet. En prenant en compte un taux d'attrition de 20 %, un total de 154 individus devra être recruté. Dans le cadre de cette étude, le groupe expérimental pourrait bénéficier d'une approche combinant plusieurs interventions incluant des exercices neurodynamiques, mais également des thérapies qui potentialisent les adaptations centrales telles que l'imagerie motrice. La durée d'intervention pourrait s'étendre sur une période de deux à trois mois.

7. CONCLUSION

Le STC est une condition musculosquelettique fréquente attribuée à une compression du nerf médian au niveau du tunnel carpien, mais également caractérisée par des adaptations des aires corticales sensorimotrices responsables du poignet et de la main. Le STC se manifeste par des déficiences sensorimotrices principalement évoquées sur le territoire de la main innervé par le nerf médian, ainsi que des incapacités fonctionnelles secondaires qui interfèrent souvent sur la participation sociale et de la qualité de vie. Les physiothérapeutes intègrent de plus en plus des exercices neurodynamiques dans les programmes de réadaptation offerts aux individus atteints d'un STC qui les consultent. Toutefois, les exercices neurodynamiques sont soutenus par un faible niveau de preuve. En fait, les mécanismes thérapeutiques par lesquels les exercices neurodynamiques peuvent être bénéfiques pour ces individus, notamment leur impact sur les propriétés biomécaniques *in vivo* du nerf médian, demeurent méconnus à ce jour. Une compréhension accrue des effets des exercices neurodynamiques est primordiale afin de guider les cliniciens dans leur choix des paramètres et des modalités thérapeutiques à offrir aux individus atteints du STC.

Les objectifs spécifiques de cette thèse ont porté sur deux volets. Le premier volet visait à déterminer les qualités psychométriques des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian à l'aide de l'imagerie quantitative par ultrasonographie. Le second volet visait d'abord à explorer les effets d'un programme fondé sur les exercices neurodynamiques offert à des individus atteints du STC et ensuite à évaluer la faisabilité, la sécurité et l'efficacité du même programme offert à des individus atteints du STC en attente d'une chirurgie de décompression du tunnel carpien en comparaison avec des individus atteints du STC en attente d'une chirurgie qui ne complétaient aucun programme d'exercices.

Les travaux du premier volet ont confirmé la pertinence de l'approche méthodologique choisie pour évaluer les propriétés biomécaniques du nerf médian. Rappelons que l'imagerie quantitative par ultrasonographie a été retenue puisque cette technologie est relativement

abordable, rapide, et non invasive (aucune radiation). Les constats de la première étude attestent que la fidélité test-retest des mesures d'excursion longitudinale du nerf médian est bonne, alors que l'erreur standard de mesure est relativement peu élevée lorsque les manœuvres neurodynamiques de glissement avec 45° d'abduction de l'épaule sont effectuées chez une population mixte incluant des individus atteints du STC. Ces résultats ont permis de formuler des recommandations dans la mesure où nous avons constaté que la moyenne de trois images ainsi que l'ajout d'une seconde visite contribuent à augmenter la fidélité (+12 %) et la précision de ces mesures (-29 %). Les constats de la deuxième étude attestent de la validité des mesures d'excursion d'un modèle fantôme de nerf acquises à l'aide l'imagerie quantitative par ultrasonographie comparativement à celles acquises par un système d'analyse de la cinétique et la cinématique du mouvement. Alors que l'évaluation d'un nerf biologique est nécessaire pour confirmer ces résultats, l'approche proposée a permis d'observer que la différence entre les deux systèmes de mesures est inférieure à l'erreur de mesure pour des amplitudes d'excursion inférieures à 10 mm. Ensemble, ces résultats permettront d'informer le développement d'une approche méthodologique standardisée de l'excursion longitudinale du nerf médian, facilitant ainsi l'agrégation des résultats de futures études étiologiques ou thérapeutiques.

Les travaux du deuxième volet de cette thèse incluaient une étude mécanistique exploratoire et une étude clinique pilote menées en parallèle. Les constats de la troisième étude suggèrent que le programme d'exercices neurodynamiques proposé a pour effet immédiat de réduire la douleur et améliorer les capacités fonctionnelles du membre supérieur chez des individus atteints du STC. Toutefois, le programme n'a eu que peu, voire aucun effet sur l'intégrité biologique et les propriétés biomécaniques du nerf médian, alors qu'une augmentation de l'excitabilité cortico-spinale a été observée. Ces résultats suggèrent que les changements cliniques observés en réponse aux exercices neurodynamiques seraient principalement attribués à des adaptations centrales et non périphériques. Les constats de la quatrième étude attestent que le programme proposé est faisable et sécuritaire. Aussi, le programme proposé semble entraîner des effets favorables sur l'interférence de la douleur, alors qu'il n'est pas supérieur à l'approche actuelle pour améliorer les capacités fonctionnelles du membre supérieur, l'intégrité biologique et les propriétés biomécaniques du nerf médian chez des individus atteints du STC immédiatement avant, ni un mois suivant la chirurgie de

décompression du tunnel carpien. Ensemble, ces deux études suggèrent que les exercices neurodynamiques n'ont aucun ou peu d'effets à court terme sur les mesures de l'intégrité et des propriétés biomécaniques du nerf médian. Toutefois, la faisabilité de notre programme d'exercices appuie la pertinence de poursuivre les efforts de recherche en lien avec cette thématique.

À travers le déroulement, les constats et les limites des différents projets de recherche présentés, cette thèse contribue à accroître le corpus de connaissances concernant l'effet des exercices neurodynamiques offerts aux individus atteints du STC. L'expérience acquise durant ces travaux pourrait être mise à contribution par des collaborations avec d'autres champs de recherche visant l'évaluation des déficiences du membre supérieur, l'étude des mécanismes neurophysiologiques en santé musculosquelettique, l'émergence des technologies en réadaptation, voir le développement d'un programme de recherche. À titre d'exemple, différentes avenues de recherches à entreprendre et explorer sont identifiées. D'abord, la standardisation de l'approche évaluative de l'excursion du nerf médian apparaît essentielle afin d'assurer une concordance entre les futures études et renforcer le niveau de preuve. Ensuite, la poursuite des travaux viserait à établir la validité prédictive d'un ensemble de biomarqueurs acquis par IQUS par rapport au niveau de déficiences sensorimotrices, de douleur et de capacité fonctionnelle. À moyen terme, la sensibilité au changement de ces biomarqueurs devra être évaluée auprès d'individus atteints du STC. Enfin, cette thèse ouvre la voie à de futurs essais cliniques auprès d'individus atteints du STC explorant les effets des exercices neurodynamiques dans le cadre d'une approche multimodale ciblant les adaptations centrales, telle qu'en combinaison avec l'imagerie motrice ou encore avec différents protocoles de stimulation magnétique transcrânienne.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Abbott, L. C., & Saunders, J. B. (1933). Injuries of the median nerve in fractures of the lower end of the radius. *Surg Gynecol Obst*, 57, 507-516.
- Akalin, E., El, O., Peker, O., Senocak, O., Tamci, S., Gulbahar, S., Cakmur, R., *et al.* (2002). Treatment of carpal tunnel syndrome with nerve and tendon gliding exercises. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 81(2), 108-113. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A11807347.
- American Academy of Orthopaedic Surgeons Work Group Panel. (2016). Management of Carpal Tunnel Syndrome Evidence-Based Clinical Practice Guideline. . Retrieved from www.aaos.org/ctsguideline]
- Atroshi, I., Gummesson, C., Johnsson, R., Ornstein, E., Ranstam, J., & Rosen, I. (1999). Prevalence of carpal tunnel syndrome in a general population. *JAMA*, 282(2), 153-158. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10411196>.
- Ballester-Perez, R., Plaza-Manzano, G., Urraca-Gesto, A., Romo-Romo, F., Atin-Arratibel, M. L., Pecos-Martin, D., Gallego-Izquierdo, T., *et al.* (2017). Effectiveness of Nerve Gliding Exercises on Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review. *J Manipulative Physiol Ther*, 40(1), 50-59. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27842937>. doi:10.1016/j.jmpt.2016.10.004
- Basson, A., Olivier, B., Ellis, R., Coppieters, M., Stewart, A., & Mudzi, W. (2017). The Effectiveness of Neural Mobilization for Neuromusculoskeletal Conditions: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 47(9), 593-615. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28704626>. doi:10.2519/jospt.2017.7117
- Baysal, O., Altay, Z., Ozcan, C., Ertem, K., Yologlu, S., & Kayhan, A. (2006). Comparison of three conservative treatment protocols in carpal tunnel syndrome. *Int J Clin Pract*, 60(7), 820-828. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16704676>. doi:10.1111/j.1742-1241.2006.00867.x
- Beaton, D. E., Katz, J. N., Fossel, A. H., Wright, J. G., Tarasuk, V., & Bombardier, C. (2001). Measuring the whole or the parts? Validity, reliability, and responsiveness of the Disabilities of the Arm, Shoulder and Hand outcome measure in different regions of the upper extremity. *Journal of Hand Therapy*, 14(2), 128-146. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A11382253.
- Bell-Krotoski, J. (2011). *Sensibility testing: history, instrumentation and clinical procedures in rehabilitation of the hand and upper extremity* (Vol. 1). Philadelphia: Elsevier Mosby.
- Bergström, K. G., Jensen, I. B., Linton, S. J., & Nygren. (1999). A psychometric evaluation of the Swedish version of the Multidimensional Pain Inventory (MPI-S): a gender differentiated evaluation. *European journal of pain (London, England)*, 3(3), 261-273.

- Retrieved from
http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A10700354.
- Bialosky, J., Bishop, M., Price, D., Robinson, M., & George, S. (2009). The mechanisms of manual therapy in the treatment of musculoskeletal pain: a comprehensive model. *Manual Therapy*, 14(5), 531-538. Retrieved from
http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A19027342.
- Bialosky, J., Bishop, M., Price, D., Robinson, M., Vincent, K., & George, S. (2009). A randomized sham-controlled trial of a neurodynamic technique in the treatment of carpal tunnel syndrome. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 39(10), 709-723. Retrieved from
http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A19801812.
- Bianchi, S., & Martinoli, C. (2007). *Ultrasound of the Musculoskeletal System*. doi:10.1007/978-3-540-28163-4
- Bland, J. D. (2007). Treatment of carpal tunnel syndrome. *Muscle & Nerve*, 36(2), 167-171. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17534984>. doi:10.1002/mus.20802
- Bland, J. D. P., & Rudolfer, S. M. (2003). Clinical surveillance of carpal tunnel syndrome in two areas of the United Kingdom, 1991-2001. *Journal of neurology, neurosurgery and psychiatry*, 74(12), 1674-1679. Retrieved from
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1757436/pdf/v074p01674.pdf>.
- Bongers, F. J., Schellevis, F. G., van den Bosch, W. J., & van der Zee, J. (2007). Carpal tunnel syndrome in general practice (1987 and 2001): incidence and the role of occupational and non-occupational factors. *Br J Gen Pract*, 57(534), 36-39. Retrieved from
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17244422>.
- Boom, J., & Visser, L. H. (2012). Quantitative assessment of nerve echogenicity: comparison of methods for evaluating nerve echogenicity in ulnar neuropathy at the elbow. *Clin Neurophysiol*, 123(7), 1446-1453. Retrieved from
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22217961>. doi:10.1016/j.clinph.2011.10.050
- Boudier-Reveret, M., Gilbert, K. K., Allegue, D. R., Moussadyk, M., Brismee, J. M., Sizer, P. S., Jr., Feipel, V., et al. (2017). Effect of neurodynamic mobilization on fluid dispersion in median nerve at the level of the carpal tunnel: A cadaveric study. *Musculoskelet Sci Pract*, 31, 45-51. Retrieved from
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28734168>. doi:10.1016/j.msksp.2017.07.004
- Bove, G. M., Ransil, B. J., Lin, H. C., & Leem, J. G. (2003). Inflammation induces ectopic mechanical sensitivity in axons of nociceptors innervating deep tissues. *J Neurophysiol*, 90(3), 1949-1955. Retrieved from
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12724363>. doi:10.1152/jn.00175.2003
- Breuer, B., Sperber, K., Wallenstein, S., Kiproviski, K., Calapa, A., Snow, B., & Pappagallo, M. (2006). Clinically significant placebo analgesic response in a pilot trial of botulinum B in patients with hand pain and carpal tunnel syndrome. *Pain Med*, 7(1), 16-24. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16533192>. doi:10.1111/j.1526-4637.2006.00084.x

- Brininger, T., Rogers, J., Holm, M., Baker, N., Li, Z.-M., & Goitz, R. (2007). Efficacy of a fabricated customized splint and tendon and nerve gliding exercises for the treatment of carpal tunnel syndrome: a randomized controlled trial. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 88(11), 1429-1435. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A17964883. doi:10.1016/j.apmr.2007.07.019
- Brochwicz, P., von Piekartz, H., & Zalpour, C. (2013). Sonography assessment of the median nerve during cervical lateral glide and lateral flexion. Is there a difference in neurodynamics of asymptomatic people? *Manual Therapy*, 18(3), 216-219. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23317635>. doi:10.1016/j.math.2012.10.001
- Broderick, J. E., Junghaenel, D. U., & Turk, D. C. (2004). Stability of patient adaptation classifications on the multidimensional pain inventory. *Pain*, 109(1-2), 94-102. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15082130>. doi:10.1016/j.pain.2004.01.014
- Brown, K., Loprinzi, P., Brosky, J., & Topp, R. (2014). Prehabilitation influences exercise-related psychological constructs such as self-efficacy and outcome expectations to exercise. *Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(1), 201-209. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A23588484. doi:10.1519/JSC.0b013e318295614a
- Buchberger, W., Judmaier, W., Birbamer, G., Lener, M., & Schmidauer, C. (1992). Carpal tunnel syndrome: diagnosis with high-resolution sonography. *AJR Am J Roentgenol*, 159(4), 793-798. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1529845>. doi:10.2214/ajr.159.4.1529845
- Burke, F. D., Bradley, M. J., Sinha, S., Wilgis, E. F., & Dubin, N. H. (2007). Primary care management of patients with carpal tunnel syndrome referred to surgeons: are non-operative interventions effectively utilised? *Postgrad Med J*, 83(981), 498-501. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17621622>. doi:10.1136/pgmj.2007.058206
- Burke, F. D., Ellis, J., McKenna, H., & Bradley, M. J. (2003). Primary care management of carpal tunnel syndrome. *Postgrad Med J*, 79(934), 433-437. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12954952>.
- Burke, J., Buchberger, D. J., Carey-Loghmani, M. T., Dougherty, P. E., Greco, D. S., & Dishman, J. D. (2007). A pilot study comparing two manual therapy interventions for carpal tunnel syndrome. *J Manipulative Physiol Ther*, 30(1), 50-61. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17224356>. doi:10.1016/j.jmpt.2006.11.014
- Butler, D. (1991). *Mobilisation of the nervous system*. Melbourne: Elsevier.
- Caliandro, P., La Torre, G., Aprile, I., Pazzaglia, C., Commodari, I., Tonali, P., & Padua, L. (2006). Distribution of paresthesias in Carpal Tunnel Syndrome reflects the degree of nerve damage at wrist. *Clin Neurophysiol*, 117(1), 228-231. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16325467>. doi:10.1016/j.clinph.2005.09.001
- Carroll, M., Yau, J., Rome, K., & Hing, W. (2012). Measurement of tibial nerve excursion during ankle joint dorsiflexion in a weight-bearing position with ultrasound imaging. *J Foot Ankle Res*, 5(1), 5. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22397397>. doi:10.1186/1757-1146-5-5

- Collinger, J., Fullerton, B., Impink, B., Koontz, A., & Boninger, M. (2010). Validation of grayscale-based quantitative ultrasound in manual wheelchair users: relationship to established clinical measures of shoulder pathology. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 89(5), 390-400. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A20407304.
- Coppieters, M., Alshami, A., & Hodges, P. (2006). An experimental pain model to investigate the specificity of the neurodynamic test for the median nerve in the differential diagnosis of hand symptoms. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 87(10), 1412-1417. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A17023255.
- Coppieters, M., & Butler, D. (2008). Do 'sliders' slide and 'tensioners' tension? An analysis of neurodynamic techniques and considerations regarding their application. *Manual Therapy*, 13(3), 213-221. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A17398140. doi:10.1016/j.math.2006.12.008
- Coppieters, M., Hough, A., & Dilley, A. (2009). Different nerve-gliding exercises induce different magnitudes of median nerve longitudinal excursion: an in vivo study using dynamic ultrasound imaging. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 39(3), 164-171. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A19252262. doi:10.2519/jospt.2009.2913
- Coppieters, M. W., & Alshami, A. M. (2007). Longitudinal excursion and strain in the median nerve during novel nerve gliding exercises for carpal tunnel syndrome. *Journal of orthopaedic research*, 25(7), 972-980. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17415752>. doi:10.1002/jor.20310
- Dahlin, L. B., Rydevik, B., McLean, W. G., & Sjostrand, J. (1984). Changes in fast axonal transport during experimental nerve compression at low pressures. *Exp Neurol*, 84(1), 29-36. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6200355>.
- de Krom, M. C., Knipschild, P. G., Kester, A. D., Thijs, C. T., Boekkooi, P. F., & Spaans, F. (1992). Carpal tunnel syndrome: prevalence in the general population. *J Clin Epidemiol*, 45(4), 373-376. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1569433>.
- Desmeules, F., Hall, J., & Woodhouse, L. (2013). Prehabilitation improves physical function of individuals with severe disability from hip or knee osteoarthritis. *Physiotherapy Canada*, 65(2), 116-124. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A24403671. doi:10.3138/ptc.2011-60
- Dhong, E. S., Han, S. K., Lee, B. I., & Kim, W. K. (2000). Correlation of electrodiagnostic findings with subjective symptoms in carpal tunnel syndrome. *Ann Plast Surg*, 45(2), 127-131. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10949338>.
- Di Lazzaro, V., & Rothwell, J. C. (2014). Corticospinal activity evoked and modulated by non-invasive stimulation of the intact human motor cortex. *J Physiol*, 592(Pt 19), 4115-4128. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25172954>. doi:10.1113/jphysiol.2014.274316

- Dilley, A., Greening, J., Lynn, B., Leary, R., & Morris, V. (2001). The use of cross-correlation analysis between high-frequency ultrasound images to measure longitudinal median nerve movement. *Ultrasound in medicine & biology*, 27(9), 1211-1218. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A11597362. doi:10.1016/S0301-5629(01)00413-6
- Dilley, A., Lynn, B., Greening, J., & DeLeon, N. (2003). Quantitative in vivo studies of median nerve sliding in response to wrist, elbow, shoulder and neck movements. *Clinical Biomechanics*, 18(10), 899-907. Retrieved from [http://www.clinbiomech.com/article/S0268-0033\(03\)00176-1/pdf](http://www.clinbiomech.com/article/S0268-0033(03)00176-1/pdf).
- Duncan, I., Sullivan, P., & Lomas, F. (1999). Sonography in the diagnosis of carpal tunnel syndrome. *AJR Am J Roentgenol*, 173(3), 681-684. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10470903>. doi:10.2214/ajr.173.3.10470903
- Durand, M. J., Vachon, B., Hong, Q. N., & Loisel, P. (2005). The cross-cultural adaptation of the DASH questionnaire in Canadian French. *Journal of Hand Therapy*, 18(1), 34-39. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15674785>. doi:10.1197/j.jht.2004.10.010
- El Miedany, Y. M., Aty, S. A., & Ashour, S. (2004). Ultrasonography versus nerve conduction study in patients with carpal tunnel syndrome: substantive or complementary tests? *Rheumatology (Oxford)*, 43(7), 887-895. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15100417>. doi:10.1093/rheumatology/keh190
- Ellis, R. (2011). *Neurodynamic evaluation of the sciatic nerve during neural mobilisation: ultrasound imaging assessment of sciatic nerve movement and the clinical implications for treatment*. (Ph.D.), AUT University, New Zealand.
- Ellis, R., Blyth, R., Arnold, N., & Miner-Williams, W. (2017). Is there a relationship between impaired median nerve excursion and carpal tunnel syndrome? A systematic review. *Journal of Hand Therapy*, 30(1), 3-12. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27692791>. doi:10.1016/j.jht.2016.09.002
- Ettema, A., Amadio, P., Zhao, C., Wold, L., & An, K.-N. (2004). A histological and immunohistochemical study of the subsynovial connective tissue in idiopathic carpal tunnel syndrome. *Journal of Bone & Joint Surgery - American Volume*, 86-A(7), 1458-1466. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A15252093.
- Fan, Z. J., Harris-Adamson, C., Gerr, F., Eisen, E. A., Hegmann, K. T., Bao, S., Silverstein, B., et al. (2015). Associations between workplace factors and carpal tunnel syndrome: A multi-site cross sectional study. *American journal of industrial medicine*, 58(5), 509-518. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25778111>. doi:10.1002/ajim.22443
- Fernandez-de-Las-Penas, C., Cleland, J. A., Plaza-Manzano, G., Ortega-Santiago, R., de-la-Llave-Rincon, A. I., Martinez-Perez, A., & Arroyo-Morales, M. (2013). Clinical, physical, and neurophysiological impairments associated with decreased function in women with carpal tunnel syndrome. *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, 43(9), 641-649. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23886648>. doi:10.2519/jospt.2013.4830
- Fernandez-de-las-Penas, C., de la Llave-Rincon, A. I., Fernandez-Carnero, J., Cuadrado, M. L., Arendt-Nielsen, L., & Pareja, J. A. (2009). Bilateral widespread mechanical pain

- sensitivity in carpal tunnel syndrome: evidence of central processing in unilateral neuropathy. *Brain*, 132(6), 1472-1479. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19336461>. doi:10.1093/brain/awp050
- Ferry, S., Pritchard, T., Keenan, J., Croft, P., & Silman, A. J. (1998). Estimating the prevalence of delayed median nerve conduction in the general population. *Br J Rheumatol*, 37(6), 630-635. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9667616>.
- Festen-Schrier, V. J. M. M., & Amadio, P. C. (2018). The biomechanics of subsynovial connective tissue in health and its role in carpal tunnel syndrome. *Journal of electromyography and kinesiology*, 38, 232-239. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A29108853.
- Foley, M., Silverstein, B., & Polissar, N. (2007). The economic burden of carpal tunnel syndrome: long-term earnings of CTS claimants in Washington State. *American journal of industrial medicine*, 50(3), 155-172. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17216630>. doi:10.1002/ajim.20430
- Geere, J., Chester, R., Kale, S., & Jerosch Herold, C. (2007). Power grip, pinch grip, manual muscle testing or thenar atrophy - which should be assessed as a motor outcome after carpal tunnel decompression? A systematic review. *BMC musculoskeletal disorders*, 8, 114. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A18028538.
- Geere, J., Chester, R., Kale, S., & Jerosch-Herold, C. (2007). Power grip, pinch grip, manual muscle testing or thenar atrophy - which should be assessed as a motor outcome after carpal tunnel decompression? A systematic review. *BMC Musculoskelet Disord*, 8, 114. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18028538>. doi:10.1186/1471-2474-8-114
- Gonzalez-Suarez, C. B., Buenavente, L. D., Cua, R. C. A., Fidel, M. B. C., Cabrera, J. C., & Regala, C. F. G. (2018). Inter-Rater and Intra-Rater Reliability of Sonographic Median Nerve and Wrist Measurements. *J Med Ultrasound*, 26(1), 14-23. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30065508>. doi:10.4103/JMU.JMU_2_17
- Gray, H., & Clemente, C. D. (1985). *Anatomy of the human body* (30th American ed.). Philadelphia: Lea & am; Febiger.
- Greenslade, J. R., Mehta, R. L., Belward, P., & Warwick, D. J. (2004). Dash and Boston questionnaire assessment of carpal tunnel syndrome outcome: what is the responsiveness of an outcome questionnaire? *Journal of hand surgery. British volume*, 29(2), 159-164. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A15010164.
- Gummeson, C., Atroshi, I., & Ekdahl, C. (2003). The disabilities of the arm, shoulder and hand (DASH) outcome questionnaire: longitudinal construct validity and measuring self-rated health change after surgery. *BMC musculoskeletal disorders*, 4, 11-11. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/PMC165599/>. doi:10.1186/1471-2474-4-11
- Heebner, M. L., & Roddey, T. S. (2008). The effects of neural mobilization in addition to standard care in persons with carpal tunnel syndrome from a community hospital.

- Journal of Hand Therapy*, 21(3), 229-240. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18652967>. doi:10.1197/j.jht.2007.12.001
- Horng, Y. S., Hsieh, S. F., Tu, Y. K., Lin, M. C., Horng, Y. S., & Wang, J. D. (2011). The comparative effectiveness of tendon and nerve gliding exercises in patients with carpal tunnel syndrome: a randomized trial. *American journal of physical medicine & rehabilitation*, 90(6), 435-442. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21430512>. doi:10.1097/PHM.0b013e318214eaaf
- Hough, A. D., Moore, A. P., & Jones, M. P. (2007). Reduced Longitudinal Excursion of the Median Nerve in Carpal Tunnel Syndrome. *Arch Phys Med Rehabil*, 88, 569-576.
- Hudak, P. L., Amadio, P. C., & Bombardier, C. (1996). Development of an upper extremity outcome measure: the DASH (disabilities of the arm, shoulder and hand) [corrected]. The Upper Extremity Collaborative Group (UECG). *American journal of industrial medicine*, 29(6), 602-608. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A8773720. doi:10.1002/(SICI)1097-0274(199606)29:6<602::AID-AJIM4>3.0.CO;2-L
- Huisstede, B., Hoogvliet, P., Randsdorp, M., Glerum, S., van Middelkoop, M., & Koes, B. (2010). Carpal tunnel syndrome. Part I: effectiveness of nonsurgical treatments--a systematic review. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 91(7), 981-1004. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A20599038.
- Huisstede, B. M., Randsdorp, M. S., Coert, J. H., Glerum, S., van Middelkoop, M., & Koes, B. W. (2010). Carpal tunnel syndrome. Part II: effectiveness of surgical treatments--a systematic review. *Arch Phys Med Rehabil*, 91(7), 1005-1024. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20599039>. doi:10.1016/j.apmr.2010.03.023
- Ibrahim, I., Khan, W. S., Goddard, N., & Smitham, P. (2012). Carpal tunnel syndrome: a review of the recent literature. *Open Orthop J*, 6, 69-76. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22470412>. doi:10.2174/1874325001206010069
- Impink, B. G., Gagnon, D., Collinger, J. L., & Boninger, M. L. (2010). Repeatability of ultrasonographic median nerve measures. *Muscle & Nerve*, 41(6), 767-773. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/mus.21619>. doi:10.1002/mus.21619
- Ioannidis, J. P., Evans, S. J., Gotzsche, P. C., O'Neill, R. T., Altman, D. G., Schulz, K., Moher, D., et al. (2004). Better reporting of harms in randomized trials: an extension of the CONSORT statement. *Ann Intern Med*, 141(10), 781-788. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15545678>. doi:10.7326/0003-4819-141-10-200411160-00009
- Kasehagen, B., Ellis, R., Pope, R., Russell, N., & Hing, W. (2018). Assessing the Reliability of Ultrasound Imaging to Examine Peripheral Nerve Excursion: A Systematic Literature Review. *Ultrasound in medicine & biology*, 44(1), 1-13. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29100792>. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2017.08.1886
- Katz, J. N., Losina, E., Amick, B. C., Fossel, A. H., Bessette, L., & Keller, R. B. (2001). Predictors of outcomes of carpal tunnel release. *Arthritis and rheumatism*, 44(5), 1184-1193. Retrieved from

- http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A1352253.
- Kerns, R. D., Turk, D. C., & Rudy, T. E. (1985). The West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory (WHYMPI). *Pain*, 23(4), 345-356. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4088697>. doi:10.1016/0304-3959(85)90004-1
- Kim, J., Koh, Y.-D., & Choi, S. (2016). Changes in Clinical Symptoms, Functions, and the Median Nerve Cross-Sectional Area at the Carpal Tunnel Inlet after Open Carpal Tunnel Release. *Clinics in Orthopedic Surgery*, 8(3), 298-302. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A27583113.
- Kleinrensink, G. J., Stoeckart, R., Mulder, P. G., Hoek, G., Broek, T., Vleeming, A., & Snijders, C. J. (2000). Upper limb tension tests as tools in the diagnosis of nerve and plexus lesions. Anatomical and biomechanical aspects. *Clinical biomechanics*, 15(1), 9-14. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A10590339.
- Kwan, M. K., Wall, E. J., Massie, J., & Garfin, S. R. (1992). Strain, stress and stretch of peripheral nerve. Rabbit experiments in vitro and in vivo. *Acta orthopaedica Scandinavica*, 63(3), 267-272. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A1609588.
- Laliberté, S., Lamoureux, J., Sullivan, M. J. L., Miller, J.-M., Charron, J., & Bouthillier, D. (2008). French translation of the Multidimensional Pain Inventory: L'inventaire multidimensionnel de la douleur. *Pain research & management*, 13(6), 497-505. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A19225607.
- Lamarche, D., Aubin, J., Provencher, J., & Barbeau, A. (2012). *Statistiques sur les lésions en « ITE » du système musculo-squelettique*. Retrieved from Québec:
- Lee, D., van Holsbeeck, M. T., Janevski, P. K., Ganos, D. L., Ditmars, D. M., & Darian, V. B. (1999). Diagnosis of carpal tunnel syndrome. Ultrasound versus electromyography. *Radiol Clin North Am*, 37(4), 859-872, x. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10442084>.
- Lee, H., Brekelmans, G. J. F., & Visser, L. H. (2016). Quantitative assessment of nerve echogenicity as an additional tool for evaluation of common fibular neuropathy. *Clin Neurophysiol*, 127(1), 874-879. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25921024>. doi:10.1016/j.clinph.2015.03.019
- Lifchez, S. D., Means, K. R., Jr., Dunn, R. E., Williams, E. H., & Dellon, A. L. (2010). Intra- and inter-examiner variability in performing Tinell's test. *J Hand Surg Am*, 35(2), 212-216. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20141891>. doi:10.1016/j.jhsa.2009.11.006
- Luchetti, R., & Amadio, P. (2002). *Carpal Tunnel Syndrome*. Heidelberg: Springer.
- Luchetti, R., Schoenhuber, R., & Nathan, P. (1998). Correlation of segmental carpal tunnel pressures with changes in hand and wrist positions in patients with carpal tunnel syndrome and controls. *J Hand Surg Br*, 23(5), 598-602. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9821601>.

- Lundborg, G. (1988). Intraneural microcirculation. *Orthop Clin North Am*, 19(1), 1-12.
Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3275919>.
- Lundborg, G., & Dahlin, L. B. (1996). Anatomy, function, and pathophysiology of peripheral nerves and nerve compression. *Hand Clin*, 12(2), 185-193. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8724572>.
- MacDermid, J. C., & Wessel, J. (2004). Clinical diagnosis of carpal tunnel syndrome: a systematic review. *Journal of Hand Therapy*, 17(2), 309-319. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15162113>. doi:10.1197/j.jht.2004.02.015
- Magee, D. J. (2008). Orthopedic physical assessment. In *Musculoskeletal rehabilitation series* (5th ed., pp. 443-444). St.Louis, Missouri: Saunders Elsevier.
- Martinoli, C., Tagliafico, A., Bianchi, S., Bodner, G., Padua, L., Schenone, A., & Graif, M. (2007). Peripheral Nerve Abnormalities. *Ultrasound Clinics*, 2(4), 655 - 667.
doi:10.1016/j.cult.2007.11.004
- McLellan, D. L., & Swash, M. (1976). Longitudinal sliding of the median nerve during movements of the upper limb. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 39(6), 566-570.
Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/950567>.
- Mondelli, M., Filippou, G., Gallo, A., & Frediani, B. (2008). Diagnostic utility of ultrasonography versus nerve conduction studies in mild carpal tunnel syndrome. *Arthritis Rheum*, 59(3), 357-366. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18311762>. doi:10.1002/art.23317
- Moran, L., Perez, M., Esteban, A., Bellon, J., Arranz, B., & del Cerro, M. (2009). Sonographic measurement of cross-sectional area of the median nerve in the diagnosis of carpal tunnel syndrome: correlation with nerve conduction studies. *J Clin Ultrasound*, 37(3), 125-131. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19170107>.
doi:10.1002/jcu.20551
- Munchau, A., Bloem, B. R., Irlbacher, K., Trimble, M. R., & Rothwell, J. C. (2002). Functional connectivity of human premotor and motor cortex explored with repetitive transcranial magnetic stimulation. *J Neurosci*, 22(2), 554-561. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11784802>.
- Nadeau, M.-J. (2014). *Imagerie quantitative par ultrasonographie du tendon d'Achille en physiothérapie : Étude de la fidélité et de la validité*. (Mémoire de maîtrise en Sciences de la réadaptation), Université de Montréal, Mémoire de maîtrise en Sciences de la réadaptation.
- Nadeau, M.-J., Desrochers, A., Lamontagne, M., Larivière, C., & Gagnon, D. (2016). Quantitative ultrasound imaging of Achilles tendon integrity in symptomatic and asymptomatic individuals: reliability and minimal detectable change. *Journal of Foot and Ankle Research*, 9, 30-30. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A27540416.
- Nadeau, M. J., Desrochers, A., Lamontagne, M., Lariviere, C., & Gagnon, D. H. (2016). Quantitative ultrasound imaging of Achilles tendon integrity in symptomatic and asymptomatic individuals: reliability and minimal detectable change. *J Foot Ankle Res*, 9, 30. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27540416>.
doi:10.1186/s13047-016-0164-3

- Nakamichi, K., & Tachibana, S. (1995). Restricted motion of the median nerve in carpal tunnel syndrome. *J Hand Surg Br*, 20(4), 460-464. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7594983>.
- Nakamichi, K., & Tachibana, S. (2002). Ultrasonographic measurement of median nerve cross-sectional area in idiopathic carpal tunnel syndrome: Diagnostic accuracy. *Muscle & Nerve*, 26(6), 798-803. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12451604>. doi:10.1002/mus.10276
- Napadow, V., Kettner, N., Ryan, A., Kwong, K. K., Audette, J., & Hui, K. K. (2006). Somatosensory cortical plasticity in carpal tunnel syndrome--a cross-sectional fMRI evaluation. *Neuroimage*, 31(2), 520-530. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16460960>. doi:10.1016/j.neuroimage.2005.12.017
- Nee, R., & Butler, D. (2006). Management of peripheral neuropathic pain: Integrating neurobiology, neurodynamics, and clinical evidence. *Physical Therapy in Sport*, 7, 36-49. doi:10.1016/j.pts.2005.10.002
- Nee, R. J., Yang, C.-H., Liang, C.-C., Tseng, G.-F., & Coppieters, M. W. (2010). Impact of order of movement on nerve strain and longitudinal excursion: a biomechanical study with implications for neurodynamic test sequencing. *Manual Therapy*, 15(4), 376-381.
- Netter, F. (2014). *Atlas of Human Anatomy* (6 ed.). Philadelphia: Saunders/Elsevier.
- Nolan, M. F. (1982). Two-point discrimination assessment in the upper limb in young adult men and women. *Phys Ther*, 62(7), 965-969. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7089059>.
- O'Connor, D., Marshall, S., & Massy-Westropp, N. (2003). Non-surgical treatment (other than steroid injection) for carpal tunnel syndrome. *The Cochrane database of systematic reviews*(1), CD003219. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12535461>. doi:10.1002/14651858.CD003219
- Olsson, I., Bunketorp, O., Carlsson, S. G., & Styf, J. (2002). Prediction of outcome in whiplash-associated disorders using West Haven-Yale Multidimensional Pain Inventory. *Clin J Pain*, 18(4), 238-244. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12131065>.
- Oudhoff, J. P., Timmermans, D. R. M., Knol, D. L., Bijnen, A. B., & van der Wal, G. (2007). Waiting for elective general surgery: impact on health related quality of life and psychosocial consequences. *BMC public health*, 7, 164-164. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17640382>. doi:10.1186/1471-2458-7-164
- Padua, L., Padua, R., Aprile, I., D'Amico, P., & Tonali, P. (2002). Carpal tunnel syndrome: relationship between clinical and patient-oriented assessment. *Clin Orthop Relat Res*(395), 128-134. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11937872>.
- Page, M., O'Connor, D., Pitt, V., & Massy Westropp, N. (2012). Exercise and mobilisation interventions for carpal tunnel syndrome. *Cochrane Database of Systematic Reviews*(6), CD009899-CD009899. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A22696387.
- Paquette, P., Lamontagne, M., Higgins, J., & Gagnon, D. H. (2015). Repeatability and Minimal Detectable Change in Longitudinal Median Nerve Excursion Measures During Upper Limb Neurodynamic Techniques in a Mixed Population: A Pilot Study Using Musculoskeletal Ultrasound Imaging. *Ultrasound in medicine & biology*, 41(7),

- 2082-2086. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25868536>. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2015.03.015
- Pelletier, R., Higgins, J., & Bourbonnais, D. (2015). Is neuroplasticity in the central nervous system the missing link to our understanding of chronic musculoskeletal disorders? *BMC Musculoskelet Disord*, 16, 25. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25887644>. doi:10.1186/s12891-015-0480-y
- Peters, S., Page, M. J., Coppieters, M. W., Ross, M., & Johnston, V. (2016). Rehabilitation following carpal tunnel release. *Cochrane Database of Systematic Reviews*(2). Retrieved from <https://doi.org/10.1002/14651858.CD004158.pub3>. doi:10.1002/14651858.CD004158.pub3
- Phalen, G. S., & Kendrick, J. I. (1957). Compression neuropathy of the median nerve in the carpal tunnel. *J Am Med Assoc*, 164(5), 524-530. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/13416008>.
- Pillen, S., van Alfen, N., Sorenson, E. J., Boon, A. J., Wu, J. S., Darras, B. T., & Rutkove, S. B. (2011). Assessing spinal muscular atrophy with quantitative ultrasound. *Neurology*, 76(10), 933. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21383332>. doi:10.1212/WNL.0b013e3182068eed
- Piña Oviedo, S., & Ortiz Hidalgo, C. (2008). The normal and neoplastic perineurium: a review. *Advances in Anatomic Pathology*, 15(3), 147-164. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A18434767.
- Pinar, L., Enhos, A., Ada, S., & Güngör, N. (2005). Can we use nerve gliding exercises in women with carpal tunnel syndrome? *Advances in therapy*, 22(5), 467-475. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A16418156.
- Portney, L. G., & Watkins, M. P. (2009). *Foundations of clinical research: applications to practice*. (3 ed.). Philadelphia: Person Prentice Hall.
- Powell, H. C., & Myers, R. R. (1986). Pathology of experimental nerve compression. *Lab Invest*, 55(1), 91-100. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3724067>.
- Raji, P., Ansari, N. N., Naghdi, S., Forogh, B., & Hasson, S. (2014). Relationship between Semmes-Weinstein Monofilaments perception Test and sensory nerve conduction studies in Carpal Tunnel Syndrome. *NeuroRehabilitation*, 35(3), 543-552. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25238864>. doi:10.3233/NRE-141150
- Ridding, M. C., Brouwer, B., Miles, T. S., Pitcher, J. B., & Thompson, P. D. (2000). Changes in muscle responses to stimulation of the motor cortex induced by peripheral nerve stimulation in human subjects. *Exp Brain Res*, 131(1), 135-143. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10759179>.
- Ridehalgh, C., Moore, A., & Hough, A. (2012). Repeatability of measuring sciatic nerve excursion during a modified passive straight leg raise test with ultrasound imaging. *Manual Therapy*, 17(6), 572-576. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22795391>. doi:10.1016/j.math.2012.06.002
- Robinson, L., & Kliot, M. (2008). Stop using arbitrary grading schemes in carpal tunnel syndrome. *Muscle & Nerve*, 37(6), 804-804. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A18506718.

- Rooks, D., Huang, J., Bierbaum, B., Bolus, S., Rubano, J., Connolly, C., Alpert, S., *et al.* (2006). Effect of preoperative exercise on measures of functional status in men and women undergoing total hip and knee arthroplasty. *Arthritis and rheumatism*, 55(5), 700-708. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A17013852. doi:10.1002/art.22223
- Rossignol, M. (1996). *Incidence du syndrome du canal carpien selon la profession sur l'île de Montréal et distribution des facteurs de risque*. Montréal: Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec.
- Rossini, P. M., Burke, D., Chen, R., Cohen, L. G., Daskalakis, Z., Di Iorio, R., Di Lazzaro, V., *et al.* (2015). Non-invasive electrical and magnetic stimulation of the brain, spinal cord, roots and peripheral nerves: Basic principles and procedures for routine clinical and research application. An updated report from an I.F.C.N. Committee. *Clin Neurophysiol*, 126(6), 1071-1107. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25797650>. doi:10.1016/j.clinph.2015.02.001
- Rozmaryn, L. M., Dovel, S., Rothman, E. R., Gorman, K., Olvey, K. M., & Bartko, J. J. (1998). Nerve and tendon gliding exercises and the conservative management of carpal tunnel syndrome. *Journal of Hand Therapy*, 11(3), 171-179. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9730093>.
- Rydevik, B., McLean, W. G., Sjostrand, J., & Lundborg, G. (1980). Blockage of axonal transport induced by acute, graded compression of the rabbit vagus nerve. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 43(8), 690-698. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6159455>.
- Rydevik, B. L., Kwan, M. K., Myers, R. R., Brown, R. A., Triggs, K. J., Woo, S. L., & Garfin, S. R. (1990). An in vitro mechanical and histological study of acute stretching on rabbit tibial nerve. *Journal of orthopaedic research*, 8(5), 694-701. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2388109>. doi:10.1002/jor.1100080511
- Schafers, M., Sommer, C., Geis, C., Hagenacker, T., Vandenabeele, P., & Sorkin, L. S. (2008). Selective stimulation of either tumor necrosis factor receptor differentially induces pain behavior in vivo and ectopic activity in sensory neurons in vitro. *Neuroscience*, 157(2), 414-423. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18838115>. doi:10.1016/j.neuroscience.2008.08.067
- Schmid, A., Elliott, J., Strudwick, M., Little, M., & Coppieters, M. (2012). Effect of splinting and exercise on intraneural edema of the median nerve in carpal tunnel syndrome--an MRI study to reveal therapeutic mechanisms. *Journal of orthopaedic research*, 30(8), 1343-1350. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A2231571. doi:10.1002/jor.22064
- Schmid, A., Nee, R., & Coppieters, M. (2013). Reappraising entrapment neuropathies--mechanisms, diagnosis and management. *Manual Therapy*, 18(6), 449-457. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A24008054.
- Schmid, A. B., Coppieters, M. W., Ruitenberg, M. J., & McLachlan, E. M. (2013). Local and remote immune-mediated inflammation after mild peripheral nerve compression in

- rats. *J Neuropathol Exp Neurol*, 72(7), 662-680. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23771220>. doi:10.1097/NEN.0b013e318298de5b
- Schwenkreis, P., Scherens, A., Ronna, A. K., Hoffken, O., Tegenthoff, M., & Maier, C. (2010). Cortical disinhibition occurs in chronic neuropathic, but not in chronic nociceptive pain. *BMC Neurosci*, 11, 73. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20540759>. doi:10.1186/1471-2202-11-73
- Shacklock, M. (2005a). *Clinical neurodynamics*: Elsevier.
- Shacklock, M. (2005b). Improving application of neurodynamic (neural tension) testing and treatments: a message to researchers and clinicians. *Manual Therapy*, 10(3), 175-179. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16038853>. doi:10.1016/j.math.2005.03.001
- Shi, Q., Bobos, P., Lalone, E. A., Warren, L., & MacDermid, J. C. (2018). Comparison of the Short-term and Long-term Effects of Surgery and Nonsurgical Intervention in Treating Carpal Tunnel Syndrome: A Systematic Review and Meta-analysis. *Hand (N Y)*. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30015499>. doi:10.1177/1558944718787892
- Silva, A., Manso, A., Andrade, R., Domingues, V., Brandao, M. P., & Silva, A. G. (2014). Quantitative in vivo longitudinal nerve excursion and strain in response to joint movement: A systematic literature review. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*, 29(8), 839-847. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25168082>. doi:10.1016/j.clinbiomech.2014.07.006
- Stagg, C. J., Bestmann, S., Constantinescu, A. O., Moreno, L. M., Allman, C., Mele, R., Woolrich, M., et al. (2011). Relationship between physiological measures of excitability and levels of glutamate and GABA in the human motor cortex. *J Physiol*, 589(Pt 23), 5845-5855. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22005678>. doi:10.1113/jphysiol.2011.216978
- Sunderland, S. (1951). A classification of peripheral nerve injuries producing loss of function. *Brain*, 74(4), 491-516. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14895767>.
- Szabo, R. M., & Chidgey, L. K. (1989). Stress carpal tunnel pressures in patients with carpal tunnel syndrome and normal patients. *J Hand Surg Am*, 14(4), 624-627. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2754193>.
- Tagliafico, A., Rubino, M., Autuori, A., Bianchi, S., & Martinoli, C. (2007). Wrist and hand ultrasound. *Semin Musculoskelet Radiol*, 11(2), 95-104. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18095242>. doi:10.1055/s-2007-1001875
- Tagliafico, A., Tagliafico, G., & Martinoli, C. (2010). Nerve density: a new parameter to evaluate peripheral nerve pathology on ultrasound. Preliminary study. *Ultrasound in medicine & biology*, 36(10), 1588-1593. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20850025>. doi:10.1016/j.ultrasmedbio.2010.07.009
- Tal Akabi, A., & Rushton, A. (2000). An investigation to compare the effectiveness of carpal bone mobilisation and neurodynamic mobilisation as methods of treatment for carpal tunnel syndrome. *Manual Therapy*, 5(4), 214-222. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A11052900.

- Tanaka, S., Wild, D. K., Seligman, P. J., Behrens, V., Cameron, L., & Putz-Anderson, V. (1994). The US prevalence of self-reported carpal tunnel syndrome: 1988 National Health Interview Survey data. *Am J Public Health*, 84(11), 1846-1848. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7977933>.
- Teaciuc, R., Lortie, M., & Patry, L. (2011). *L'utilisation des connaissances sur le syndrome du canal carpien vue à travers les interventions à la Commission des lésions professionnelles*. Retrieved from <http://www.irsst.qc.ca/publications-et-outils/publications-scientifiques/a/0699>
- Tecchio, F., Padua, L., Aprile, I., & Rossini, P. M. (2002). Carpal tunnel syndrome modifies sensory hand cortical somatotopy: a MEG study. *Hum Brain Mapp*, 17(1), 28-36. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12203686>. doi:10.1002/hbm.10049
- Topp, K., & Boyd, B. (2006). Structure and biomechanics of peripheral nerves: nerve responses to physical stresses and implications for physical therapist practice. *Physical therapy*, 86(1), 92-109. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A16386065.
- Totten, P. A., & Hunter, J. M. (1991). Therapeutic techniques to enhance nerve gliding in thoracic outlet syndrome and carpal tunnel syndrome. *Hand Clin*, 7(3), 505-520. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1939356>.
- Tuzuner, S., Ozkaynak, S., Acikbas, C., & Yildirim, A. (2004). Median nerve excursion during endoscopic carpal tunnel release. *Neurosurgery*, 54(5), 1155-1160; discussion 1160-1151. Retrieved from <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?>
- Vos, T., Flaxman, A. D., Naghavi, M., Lozano, R., Michaud, C., Ezzati, M., Shibuya, K., *et al.* (2012). Years lived with disability (YLDs) for 1160 sequelae of 289 diseases and injuries 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *Lancet*, 380(9859), 2163-2196. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23245607>. doi:10.1016/S0140-6736(12)61729-2
- Vucic, S., Ziemann, U., Eisen, A., Hallett, M., & Kiernan, M. C. (2013). Transcranial magnetic stimulation and amyotrophic lateral sclerosis: pathophysiological insights. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, 84(10), 1161-1170. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23264687>. doi:10.1136/jnnp-2012-304019
- Wainner, R. S., Fritz, J. M., Irrgang, J. J., Delitto, A., Allison, S., & Boninger, M. L. (2005). Development of a clinical prediction rule for the diagnosis of carpal tunnel syndrome. *Arch Phys Med Rehabil*, 86(4), 609-618. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15827908>. doi:10.1016/j.apmr.2004.11.008
- Watanabe, T., Ito, H., Sekine, A., Katano, Y., Nishimura, T., Kato, Y., Takeda, J., *et al.* (2010). Sonographic evaluation of the peripheral nerve in diabetic patients: the relationship between nerve conduction studies, echo intensity, and cross-sectional area. *J Ultrasound Med*, 29(5), 697-708. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20427781>.
- Werner, R., & Andary, M. (2002). Carpal tunnel syndrome: pathophysiology and clinical neurophysiology. *Clinical neurophysiology*, 113(9), 1373-1381. Retrieved from http://opurl.bib.umontreal.ca:9003/sfx_local?sid=Entrez%3APubMed&id=pmid%3A12169318.

- Wilgis, E. F., & Murphy, R. (1986). The significance of longitudinal excursion in peripheral nerves. *Hand Clin*, 2(4), 761-766. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3025228>.
- Wright, T. W., Glowczewskie, F., Wheeler, D., Miller, G., & Cowin, D. (1996). Excursion and strain of the median nerve. *J Bone Joint Surg Am*, 78(12), 1897-1903. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8986667>.
- Yoshii, Y., Villarraga, H. R., Henderson, J., Zhao, C., An, K. N., & Amadio, P. C. (2009). Ultrasound assessment of the displacement and deformation of the median nerve in the human carpal tunnel with active finger motion. *J Bone Joint Surg Am*, 91(12), 2922-2930. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19952256>. doi:10.2106/JBJS.H.01653

Annexe I : Certificats d'éthique

Comité d'éthique de la recherche
des établissements du CRIR



Certificat d'éthique (Renouvellement)

Pour fins de renouvellement, le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR, selon la procédure d'évaluation accélérée en vigueur, a examiné le projet de recherche **CRIR-828-0313** intitulé :

« Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur: Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par ultrasonographie ».

Présenté par: **Dany Gagnon, Ph.D.**
Martin Lamontagne, MD, FRCP
Philippe Paquette, pht. Msc.

Le présent projet répond aux exigences éthiques de notre CÉR. Ce projet se déroule dans le site du CRIR suivant : Institut de réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal.

Ce certificat est valable pour un an. En acceptant le présent certificat d'éthique, le chercheur s'engage à :

1. Informer, dès que possible, le CÉR de tout changement qui pourrait être apporté à la présente recherche ou aux documents qui en découlent (Formulaire M) ;
2. Notifier, dès que possible, le CÉR de tout incident ou accident lié à la procédure du projet ;
3. Notifier, dès que possible, le CÉR de tout nouveau renseignement susceptible d'affecter l'intégrité ou l'éthicité du projet de recherche, ou encore, d'influer sur la décision d'un sujet de recherche quant à sa participation au projet ;
4. Notifier, dès que possible, le CÉR de toute suspension ou annulation d'autorisation relative au projet qu'aura formulée un organisme de subvention ou de réglementation ;
5. Notifier, dès que possible, le CÉR de tout problème constaté par un tiers au cours d'une activité de surveillance ou de vérification, interne ou externe, qui est susceptible de remettre en question l'intégrité ou l'éthicité du projet ainsi que la décision du CÉR ;
6. Notifier, dès que possible, le CÉR de l'interruption prématurée, temporaire ou définitive du projet. Cette modification doit être accompagnée d'un rapport faisant état des motifs à la base de cette interruption et des répercussions sur celles-ci sur les sujets de recherche ;
7. Fournir annuellement au CÉR un rapport d'étape l'informant de l'avancement des travaux de recherche (formulaire R) ;
8. Demander le renouvellement annuel de son certificat d'éthique ;
9. Tenir et conserver, selon la procédure prévue dans la *Politique portant sur la conservation d'une liste des sujets de recherche*, incluse dans le cadre réglementaire des établissements du CRIR, une liste des personnes qui ont accepté de prendre part à la présente étude ;
10. Envoyer au CÉR une copie de son rapport de fin de projet / publication.



Président du CÉR



Date d'émission
5 juin 2014



Comité d'éthique de la recherche du CHUM
Pavillon R, 900 rue St-Denis, 3^e étage
Montréal (Québec) H2X 0A9

Le 28 août 2015

Docteur Michel Alain Danino

a/s : Docteur Philippe Paquette
courriel : philippe.paquette@umontreal.ca

Objet :	Résultat positif de l'examen éthique et de l'examen scientifique du projet de recherche suivant:
	Effets d'un programme de réadaptation préopératoire à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques offert à des individus ayant un syndrome du tunnel carpien en attente de chirurgie de décompression - MP-02-2016-5999 - CE 15.097

Docteur,

Le Comité d'éthique de la recherche (CÉR) du CHUM, qui agit comme CÉR évaluateur pour le projet de recherche mentionné en titre, évalué en comité restreint, déclare par la présente que le résultat de l'examen éthique de ce projet de recherche est positif.

Notre CÉR confirme également que vous avez déposé les documents requis pour établir que votre projet de recherche a fait l'objet d'un examen scientifique dont le résultat est positif.

Outre les documents énumérés dans la lettre de déclaration du CÉR évaluateur, les documents suivants révisés à la demande du CÉR ont également été approuvés :

- Formulaire d'information et de consentement français principal modifié - version datée du 28 août 2015
- Protocole de recherche
- Annexe 2

La présente constitue donc l'approbation finale du CÉR de votre projet de recherche, **valide pour un an à compter du 28 août 2015**. Vous retrouverez dans Nagano une copie du formulaire de consentement portant l'estampille d'approbation du Comité. Seule cette version finale devra être utilisée pour signature par les participants à la recherche.

Veuillez noter que le projet de recherche ne pourra débuter avant que vous n'ayez reçue la lettre de la personne/instance mandatée du CÉR. De même, lorsque cela s'applique à votre situation, le projet ne pourra commencer avant d'avoir fait parvenir la lettre de non objection (LNO – NOL) de Santé Canada pour ce projet au CÉR du CHUM.

Attestation du CÉR (REBA)

La composition du comité d'éthique de la recherche du CHUM est conforme aux exigences réglementaires de la partie C, Division 5 du Food and Drug regulations de Santé Canada ; Le comité exerce ses fonctions conformément aux exigences des Bonnes pratiques cliniques ; Le comité d'éthique de la recherche du CHUM a révisé et approuvé le protocole et le formulaire d'information et de consentement pour l'essai clinique mentionné en titre, qui sera réalisé au CHUM par l'investigateur qualifié nommé ci-haut. Cette approbation et les exigences du comité d'éthique ont été documentées par écrit.

Comme le prévoit l'article 11.1 du *Cadre de référence des établissements publics du réseau de la santé et des services sociaux (RSSS) pour l'autorisation d'une recherche menée dans plus d'un établissement*, vous pouvez déposer une copie de la présente lettre de notre CÉR auprès des établissements publics du RSSS à qui vous demanderez l'autorisation de réaliser la recherche dans leurs murs ou sous leurs auspices.

Si un établissement vous demande d'apporter **des modifications administratives** (seules celles-ci étant autorisées) à la version finale d'un document qui a été approuvé par notre CÉR, veuillez vous entendre avec cet établissement pour que notre CÉR reçoive une copie du document modifié indiquant clairement les modifications apportées.

Vous devrez compléter le formulaire de renouvellement que nous vous ferons parvenir annuellement, et ce via la plateforme Nagano. De même, vous devrez soumettre pour approbation préalable, toute demande de modification ou document de suivi requis par le Comité d'éthique conformément à ses Statuts et Règlements et ce via Nagano.

La Cadre de référence établit, à l'article 11.2, que vous pouvez fournir une copie de la présente lettre à un autre chercheur qui veut demander à son établissement l'autorisation d'y mener la même recherche. Lorsque vous fournirez ainsi une copie de cette lettre, veuillez :

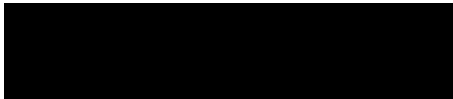
- 1) rappeler au chercheur qu'il doit, si ce n'est déjà fait :
 - s'identifier et identifier son établissement auprès de notre CÉR ;
 - fournir à notre CÉR les documents démontrant sa compétence pour la réalisation du projet ;
 - et fournir à notre CÉR l'information utile au sujet des populations et des conditions locales qui serait susceptible d'avoir une incidence sur l'évaluation de l'acceptabilité éthique du projet de recherche.
- 2) indiquer à ce chercheur que notre CÉR lui demande de déposer à chaque année (indiquer une date limite), un rapport annuel sur le déroulement de la recherche dans son établissement.

L'omission par le chercheur d'un établissement de déposer ce rapport annuel ne compromettra pas le renouvellement annuel de l'approbation éthique couvrant l'ensemble de ce projet de recherche. Notre CÉR évaluateur pourra cependant demander à la personne qui a autorisé la réalisation de la recherche dans cet établissement de suspendre l'autorisation donnée à un chercheur qui n'a pas déposé le rapport annuel demandé.

Le Comité d'éthique de la recherche du CHUM exerce ses activités en conformité avec les exigences légales et réglementaires applicables au Québec et avec les directives du Ministère de la santé et des services sociaux. Il suit également les règles de constitution et de fonctionnement de l'Énoncé de Politique des trois Conseils (ÉPTC 2) et des Bonnes pratiques cliniques de la CIH.

Pour toute question relative à cette correspondance et/ou reliée au processus d'évaluation éthique des projets multicentriques, veuillez communiquer avec le secrétariat du comité par téléphone ou courriel : autorisation.recherche.chum@ssss.gouv.qc.ca - [REDACTED], ou consulter le fichier « Questions-réponses » au bas de la page d'accueil Nagano.

Vous souhaitant la meilleure des chances dans la poursuite de vos travaux, nous vous prions d'accepter, cher Docteur, nos salutations distinguées.



Présidente intérimaire
Comité d'éthique de la recherche du CHUM

Montréal, le 27 mai 2015

Monsieur Dany Gagnon, Ph.D.
CRIR - site de l'IRGLM
6300, avenue Darlington
Montréal (Québec) H3S 2J4

- o Centre de réadaptation
Constance-Leithbridge
- o Centre de réadaptation
Lucie-Bruneau
- o Hôpital juif de réadaptation
- o Institut de réadaptation
Gingras-Lindsay-de-Montréal
- o Institut Nazareth
et Louis-Braille
- o Institut Raymond-Dewar

Partenaires

- o Centre de réadaptation en
déficience physique Le Boulcier
- o Centre de réadaptation Estrie
- o Centre de réadaptation
MAB-Mackay

Objet : Émission de votre certificat d'éthique
Notre dossier : CRIR-1073-0415

Monsieur,

Vous trouverez, ci-joint, une copie du certificat d'éthique qui a été décerné pour votre projet de recherche intitulé « Effets d'un programme de réadaptation à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques offert à des individus atteints du syndrome du tunnel carpien ». Ce certificat, ainsi que les documents approuvés, sont également disponibles sur la plateforme de soumission des projets de recherche.

Accès : <http://ethique.crir.ca/acceschercheur/>

Ce certificat est valable pour un an. Le CÉR demande à être informé de toute modification qui pourrait être apportée au projet de recherche mentionné ci-dessus (Formulaire M à compléter via la plateforme).

De plus, nous vous demandons de contacter la personne suivante afin de l'aviser du début de votre projet de recherche :

Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal du CIUSSS du Centre-Est-de-l'Île-de-Montréal

■ [Redacted]

Vous recevrez, Monsieur Gagnon, mes cordiales salutations.

[Redacted]

Coordonnatrice à l'éthique de la recherche
des établissements du CRIR

■ [Redacted]
anolet.crir@ssss.gouv.qc.ca

AN/cl

Pièces jointes : certificat d'éthique et copie des documents approuvés

c.c. : Marie-Thérèse Laramée, IRGLM

Annexe II : Formulaire de consentement

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

Laboratoire de
pathoKinésiologie



INSTITUT DE RÉADAPTATION
Gingras-Lindsay-de-Montréal

Formule d'information et de consentement pour votre participation à un projet de recherche

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

► ÉQUIPE DE RECHERCHE

Philippe Paquette, pht, MSc.
Stagiaire en recherche

Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal (IRGLM)

Dany Gagnon, pht, Ph.D
Professeur/chercheur

Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal (IRGLM)

Martin Lamontagne, MD, FRCP
Physiatre

Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal (IRGLM)

ORGANISMES SUBVENTIONNAIRES

Cette étude est financée en partie par la bourse de chercheur-boursier Junior 1 du Fonds de la recherche en santé du Québec (FRSQ) et des fonds de démarrage mis à sa disposition par l'Université de Montréal et le Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation (CRIR). Les équipements requis pour la réalisation de ce projet ont été financés par le Fonds canadien pour l'innovation (FCI) et l'Institut Robert-Sauvé en santé et sécurité au travail.

PRÉAMBULE

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche visant à analyser les déplacements et déformations du nerf médian au niveau du poignet lors de mouvements ciblés de votre tête et de votre membre supérieur.

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 1 de 7

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement l'ensemble des renseignements présentés dans ce formulaire de consentement. Ce formulaire de consentement vous explique le but, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients de cette étude, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles aux chercheurs et aux autres membres du personnel affectés au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES OBJECTIFS

Chez les individus souffrant du syndrome du tunnel carpien (STC), l'intégrité du nerf médian est souvent mise en cause. Afin de vérifier l'intégrité du nerf médian, les physiothérapeutes réalisent souvent des mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur visant à mobiliser le tissu nerveux lors des évaluations ou des traitements. Or, les physiothérapeutes ne disposent d'aucune mesure objective permettant de caractériser les déplacements et la déformation du nerf médian *in vivo*. L'imagerie quantitative par échographie (IQUS), une approche émergente en physiothérapie, pourrait corriger cette lacune.

Le premier objectif vise à mesurer la fiabilité test-retest et à établir le seuil de changement minimal détectable du déplacement et de la déformation du nerf médian auprès d'un groupe formé d'individus sains et d'individus atteints d'un syndrome du tunnel carpien. Le deuxième objectif vise à vérifier si la mobilité et la déformation du nerf médian, mesurées par IQUS lors des mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur, diffèrent entre des individus sains (groupe contrôle) et des individus atteints du STC (groupe expérimental). Le troisième objectif vise à comparer la quantité du déplacement et de déformation du nerf médian obtenu en fonction de la combinaison de mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur. Afin de répondre à ces objectifs, cette étude préliminaire nécessitera de 1) développer un montage expérimental permettant d'appliquer des séquences de mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur utilisées cliniquement; 2) mesurer des paramètres statiques (ex : hauteur, largeur, aire transverse) et dynamiques (ex : déplacement et déformation) du nerf médian en fonction des différentes combinaisons de mouvements de la tête et du membre supérieur à l'aide de programmes d'analyse spécialement adaptés pour le présent projet.

Cette étude contribuera à fournir des connaissances nécessaires à la réalisation d'un projet ultérieur visant à étudier l'association entre la propulsion manuelle du fauteuil roulant et la prévalence du syndrome du tunnel carpien chez les individus ayant une lésion de la moelle épinière.

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 2 de 7

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

NATURE ET DURÉE DE LA PARTICIPATION

Votre participation à ce projet implique que vous devrez participer à une séance d'évaluation au Laboratoire de pathokinésiologie d'une durée totale d'environ 2h au Centre de recherche (4^{ième} étage) de l'Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal.

Pour cette étude, différents groupes de participants seront sollicités. Premièrement, des personnes ayant reçu un diagnostic de syndrome du tunnel carpien seront référées par des médecins affiliés à l'IRGLM. Deuxièmement, des personnes en bonne santé seront sollicitées via des fiches de recrutements. Finalement, des personnes utilisant un fauteuil roulant manuel comme principal moyen de locomotion au quotidien seront sollicités.

► Examen clinique

Un examen clinique, effectué par un physiothérapeute, comprendra un questionnaire (âge, taille, masse corporelle, condition de santé, etc.), une évaluation de la sensibilité et de la force de chacune des mains, une évaluation de l'amplitude des mouvements aux membres supérieurs (cou, épaule, coude, poignet) ainsi que la réalisation de tests spécifiques associés au STC (test de Tinel, test de Phalen).

► Préparatifs avant la réalisation des tâches expérimentales

Vous serez conviés à vous installer sur une table d'examen équipée d'un support pour la tête et de différents appuis pour les membres supérieurs. Avant le début des différents mouvements ciblés de la tête et des membres supérieurs, des marques seront faites à l'aide d'un crayon à l'encre une fois le nerf médian identifié sur chacun de vos poignets qui seront évalués. Ces marques permettront de s'assurer que la sonde d'échographie demeure au même endroit durant l'expérience. Pour permettre l'enregistrement d'images, un gel de conduction sera appliqué entre la peau et la sonde.

► Mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur visant à mettre sous tension le nerf médian

Tous les mouvements seront débutés à partir d'une position de base dans laquelle la main sera maintenue en position neutre (doigts étendus), le coude sera complètement étendu et l'épaule sera stabilisée, tournée vers l'extérieur (rotation externe) et éloignée du corps (abduction) afin de produire un angle de 45° ou 90° entre le bras et le corps.

Chaque séquence de mouvement sera répétée trois fois. Une fois ces séquences complétées, l'évaluateur éloignera davantage l'épaule (abduction 90°) et reprendra les séquences de mouvements. Le tout sera complété aux deux bras.

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 3 de 7

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

Test #1 : Mouvement du poignet

Lors de ce test, le poignet sera déplacé du haut vers le bas (extension) et le mouvement sera limité grâce au montage.

Test #2 : Mouvements de la tête et du poignet du côté opposé

Lors de ce test, le poignet sera maintenu vers le bas (extension) à 30°. La tête reposant sur un support sera déplacée de 30° du côté opposé (inclinaison controlatérale) au poignet testé. Lors de cette séquence, le participant exécutera lui-même le mouvement de la tête et sera guidé par le support afin de produire un mouvement optimal.

Test #3 : Mouvements du poignet et de la tête du même côté

Lors de ce test, la position sera identique au mouvement précédent à l'exception que la tête aura la possibilité d'être déplacée de 30° du même côté (inclinaison ipsilatérale) que le poignet testé. Lors de cette séquence, le sujet exécutera lui-même le mouvement de la tête.

AVANTAGES PERSONNELS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

Puisque cette étude est expérimentale, il est probable que vous ne retiriez aucun avantage personnel en participant au présent projet de recherche. Par ailleurs, vous aurez contribué à l'avancement des connaissances nécessaires à l'amélioration des protocoles d'évaluation et d'interventions thérapeutiques en physiothérapie ciblant la population atteinte d'un syndrome du tunnel carpien.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

Les mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur prévus dans le présent projet pourraient occasionner de l'inconfort ou des douleurs chez certaines personnes. Les personnes atteintes d'un syndrome du tunnel carpien pourraient voir leurs symptômes augmentés lors des mouvements. Pour minimiser les risques d'inconfort ou de douleur, le membre supérieur sera relâché entre chaque répétition afin d'éliminer la mise en tension du nerf médian.

Il est possible que l'évaluation par échographie révèle des anomalies non prévues des structures évaluées (présence de muscles accessoires, masse, etc.). Si tel est le cas, l'évaluateur vous recommandera de consulter un spécialiste afin de porter un diagnostic et décider si des traitements sont nécessaires.

INCONVÉNIENTS PERSONNELS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 4 de 7

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

Les inconvénients reliés à votre participation à cette étude sont minimes. Nous sommes toutefois conscients que la durée de la séance d'évaluation en laboratoire (1½ - 2 heures) peut entraîner une certaine fatigue. Dans ce cas, des pauses sont permises en tout temps sur demande. Le déplacement pour vous rendre au laboratoire pourrait représenter un inconvénient pour certaines personnes.

ACCÈS À VOTRE DOSSIER MÉDICAL

Concernant les participants atteints de syndrome du tunnel carpien, vous acceptez que les personnes responsables de ce projet aient accès à une copie de votre dossier médical concernant les résultats au test d'électromyographie, préalable à votre participation, pendant la durée de la présente étude.

CONFIDENTIALITÉ

Il est entendu que les observations effectuées en ce qui vous concerne, dans le cadre du projet de recherche décrit ci-dessus, demeureront strictement confidentielles. À cet effet, tous les renseignements personnels et cliniques recueillis à votre sujet au cours de l'étude sur les différents formulaires seront codés de façon à ce qu'ils demeurent confidentiels et conservés sous clé dans une filière du Laboratoire de pathokinésiologie de l'Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal par le responsable de l'étude pendant une période de 5 ans suivant la fin du projet. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès.

Cependant, à des fins de contrôle du projet de recherche, votre dossier pourrait être consulté par une personne mandatée par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR ou par l'Unité de l'éthique du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, qui adhère à une politique de stricte confidentialité. L'ensemble des renseignements personnels des participants sera détruit 5 ans après la fin du projet.

AUTORISATION D'UTILISER LES RÉSULTATS

Vous acceptez que l'information recueillie puisse être utilisée pour fins de communication scientifique, professionnelle et d'enseignement. Il est entendu que lors de la présentation des résultats de cette recherche, rien ne pourra permettre de vous identifier.

INFORMATIONS CONCERNANT LE PROJET ET PERSONNES RESSOURCES

On devra répondre, à votre satisfaction, à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche auquel vous acceptez de participer. Pour toute information ou question, vous pourrez communiquer avec Dany Gagnon, pht, Ph.D. en sciences biomédicales (option réadaptation), responsable du projet, au numéro de téléphone [REDACTED] ou par courriel à l'adresse : dany.gagnon.2@umontreal.ca ou, s'il est absent, avec Marie-Thérèse Laramée, pht,

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

M.Sc., coordonnatrice de la recherche clinique à l'Institut de Réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal au [REDACTED]

Si vous avez des questions sur vos droits et recours ou sur votre participation à ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Me Anik Nolet, coordonnatrice à l'éthique de la recherche des établissements du CRIR au [REDACTED] ou par courriel à l'adresse : anolet.crir@ssss.gouv.qc.ca

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION

Il est entendu que votre participation au projet de recherche décrit ci-dessus est tout à fait libre et volontaire; il est également entendu que vous avez le droit de refuser d'y participer ou que vous pourrez, à tout moment, mettre un terme à votre participation sans aucun préjudice et sans que cela n'affecte les services de santé auxquels vous aurez droit à l'Institut de Réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal ou dans d'autres établissements. En cas de retrait de votre part, les données recueillies seront conservées à moins que vous ne nous demandiez de les détruire.

CLAUSE DE RESPONSABILITÉ

Il est entendu qu'en acceptant de participer à cette étude, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, les organismes subventionnaires et les institutions impliqués de leurs obligations légales et professionnelles.

INDEMNITÉ COMPENSATOIRE

Une indemnité compensatoire de 25.00\$ vous sera remise afin de compenser les dépenses encourues par votre participation à la séance évaluation prévue dans le présent projet de recherche.

CONSENTEMENT

Je déclare avoir lu et compris le présent projet, la nature et l'ampleur de ma participation, ainsi que les risques auxquels je m'expose tels que présentés dans le présent formulaire. J'ai eu l'occasion de poser toutes les questions concernant les différents aspects de l'étude et de recevoir des réponses à ma satisfaction.

Je, soussigné(e), accepte volontairement de participer à cette étude. Je peux me retirer en tout temps sans préjudice d'aucune sorte. Je certifie qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision et je sais qu'une copie de ce formulaire figurera dans mon dossier médical.

- J'accepte d'être contacté (e) dans le futur par le même chercheur principal pour d'autres études dans un domaine de recherche connexe :

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 6 de 7

Quantification du déplacement et de la déformation du nerf médian lors de manœuvres neurodynamiques du membre supérieur :

Une étude préliminaire avec imagerie quantitative par échographie

- ☐ non
☐ oui (pour une durée d'un an) *
☐ oui (pour une durée de deux ans) *
☐ oui (pour une durée de cinq ans) *

* *Notez que si vous cochez l'une de ces trois cases, vos coordonnées personnelles seront conservées par le chercheur principal pour la période à laquelle vous avez consenti.*

- J'accepte que les données recueillies au cours de cette étude soient utilisées pour d'autres publications scientifiques demeurant en lien (domaine de recherche connexe) avec le présent projet.

oui ☐ non ☐

Une copie signée de ce formulaire d'information et de consentement doit m'être remise.

Nom du participant

Signature

Fait à Montréal, le _____, 2013.

ENGAGEMENT DU CHERCHEUR

Je, soussigné (e), _____, certifie

- (a) avoir expliqué au signataire les termes du présent formulaire;
- (b) avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard;
- (c) lui avoir clairement indiqué qu'il reste, à tout moment, libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus;
- (d) que je lui remettrai une copie signée et datée du présent formulaire.

Signature du responsable du projet ou de son représentant

Fait à Montréal, le _____, 2013.

Projet approuvé par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR

Page 7 de 7



Formule d'information et de consentement pour votre participation à un projet de recherche

Effets d'un programme de réadaptation à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques offert à des individus atteints du syndrome du tunnel carpien

◆ ÉQUIPE DE RECHERCHE

Philippe Paquette, pht, MSc. Étudiant au doctorat en Sciences de la réadaptation	Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de- Montréal (IRGLM)
Johanne Higgins, erg, Ph.D. Professeure/chercheure	Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de- Montréal (IRGLM)
Dany Gagnon, pht, Ph.D. Professeur/chercheur	Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de- Montréal (IRGLM)

PRÉAMBULE

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche visant à évaluer les effets d'un programme d'exercices de réadaptation d'une durée de quatre semaines à compléter à domicile offert aux individus souffrant du syndrome du tunnel carpien (STC). Ce programme, facile à réaliser et nécessitant peu de temps, incorpore uniquement des exercices de mobilisation du nerf médian (un des principaux nerfs dans votre bras qui se situe près de la paume de la main).

Avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement l'ensemble des renseignements présentés dans ce formulaire de consentement. Ce formulaire de consentement vous explique le but, les procédures, les avantages, les risques et inconvénients de cette étude, de même que les personnes avec qui communiquer au besoin.

Le présent formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles aux chercheurs et aux autres membres du personnel affectés au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

DESCRIPTION DU PROJET ET DE SES OBJECTIFS

Chez les individus souffrant du STC, le nerf médian est souvent affecté. Le STC cause des déficiences physiques (p.ex. : douleur, picotement, fourmillement, faiblesse de la main) qui peuvent limiter la capacité à réaliser les tâches de la vie quotidienne impliquant le poignet et la main (p.ex. : prendre ou manipuler des objets avec les mains) et la participation sociale. Les physiothérapeutes recommandent souvent des exercices qui ont pour but de « déplacer » ou « étirer » le nerf à l'intérieur du bras. Concrètement, ces exercices impliquent des mouvements du bras et du cou dans un ordre spécifique afin d'améliorer la mobilité du nerf médian à l'intérieur des tissus environnants (p.ex. : muscles et tendons). Nous croyons que ces exercices de mobilisations « neurodynamiques » ont un effet favorable sur le nerf médian et pourront améliorer les déficiences et incapacités fonctionnelles au poignet et à la main chez les individus souffrant du STC.

L'objectif principal vise à déterminer si les déficiences ainsi que les incapacités au poignet et à la main seront améliorées chez les participants ayant un STC qui complètent un programme de réadaptation fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques du nerf médian.

Le deuxième objectif vise à mesurer si des changements surviennent au niveau du nerf médian et au niveau de la région du cerveau responsable de la main chez les participants ayant complété le programme de réadaptation.

Afin de répondre à ces objectifs, cette étude impliquera 1) la réalisation d'un programme d'exercices expérimental comprenant des mouvements ciblés du bras et du cou à domicile avec supervision indirecte (c.-à-d. suivi téléphonique à chaque semaine) pour une période de quatre semaines; 2) la participation à trois séances d'évaluation, dont deux en laboratoire, permettant de mesurer des déficiences au poignet et à la main (p.ex. : questionnaires standardisés, tests cliniques couramment utilisés pour l'évaluation du STC) et incapacités fonctionnelles, des mesures d'imagerie par échographie (p.ex. : hauteur, largeur, aire transverse, déplacement et déformation du nerf médian) permettant de caractériser les nerfs médian et finalement, des mesures par stimulation magnétique transcrânienne (p.ex. : seuil moteur, potentiel moteur évoqué) permettront de caractériser la région du cerveau responsable du contrôle de la main. Cette étude contribuera à fournir de nouvelles connaissances sur l'efficacité d'un programme de réadaptation fondé sur des exercices neurodynamiques ainsi que sur la pertinence d'instaurer un tel programme chez les individus atteints du STC.

NATURE ET DURÉE DE LA PARTICIPATION

Votre participation à ce projet implique que vous devrez participer à trois séances d'évaluation au Laboratoire de pathokinésiologie du Centre de recherche (4^{ième} étage) à l'Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal. La première séance aura lieu lors de la visite initiale alors que la deuxième séance aura lieu après la réalisation du programme de réadaptation. Les évaluations en laboratoire auront une durée totale d'environ 2 ½ heures. Une troisième évaluation aura lieu quatre semaines après avoir complété le programme de réadaptation et sera réalisée en personne ou par téléphone à votre convenance. Ces séances d'évaluations sont détaillées ci-dessus, à noter que seul les questionnaires seront évalués lors de la dernière séance et aura donc une durée totale plus courte, soit d'environ 1 heure.

◆ Évaluation clinique (~ 2 ½ heures)

Mesures des déficiences et incapacités fonctionnelles (~ ½ heure)

Un examen clinique, effectué par un physiothérapeute, comprendra un questionnaire général (âge, taille, masse corporelle, condition de santé, etc.), ainsi que trois questionnaires visant à évaluer les symptômes au poignet et à la main. Par la suite, un examen physique comprendra l'évaluation de la sensibilité, de la discrimination deux-points, de l'amplitude des mouvements aux membres supérieurs (cou, épaule, coude, poignet) et de la force musculaire de chacune des mains ainsi que la réalisation de tests spécifiques associés au STC (test de Tinel, test de Phalen, ULNT 1).

Mesures du nerf médian par imagerie par échographie (~ 1 heure)

Un examen d'imagerie par échographie, effectué par un membre de l'équipe de recherche, sera réalisé au niveau de votre poignet. Vous serez installé sur une table d'examen équipée d'un support pour la tête et de différents appuis pour les membres supérieurs. Avant le début des différents mouvements ciblés de la tête et des membres supérieurs, des marques seront faites à l'aide d'un crayon à l'encre une fois le nerf médian identifié sur chacun de vos poignets qui seront évalués. Ces marques permettront de s'assurer que la sonde d'échographie demeure au même endroit durant l'expérience. Pour permettre l'enregistrement d'images, un gel de conduction sera appliqué entre la peau et la sonde. Ensuite, des images et des films permettront de mesurer la déformation et l'excursion du nerf médian lors de deux manœuvres (A et B) décrites ci-dessous. Tous les mouvements seront débutés à partir d'une position de base dans laquelle la main sera maintenue en position neutre (doigts étendus), le coude sera complètement étendu et l'épaule sera stabilisée, tournée vers l'extérieur (rotation externe) et éloignée du corps (abduction) afin de produire un angle de 45° ou 90° entre le bras et le corps.

Manœuvre A: Mouvements de la tête et du poignet du côté opposé

Lors de ce test, le poignet sera maintenu vers le bas (extension) à 30°. La tête reposant sur un support sera déplacée de 30°, par un assistant, du côté opposé (inclinaison controlatérale) au poignet testé.

Manœuvre B: Mouvements du poignet et de la tête du même côté

Lors de ce test, la position sera identique au mouvement précédent à l'exception que la tête aura la possibilité d'être déplacée de 30°, par un assistant, du même côté (inclinaison ipsilatérale) que le poignet testé.

Chaque séquence de mouvement sera répétée trois fois et effectuée aux deux bras. Une fois ces séquences complétées, l'évaluateur éloignera davantage l'épaule de votre corps (abduction 90°) et reprendra les séquences de mouvements (3 manœuvres X 2 bras X 2 amplitudes articulaires à l'épaule = 12 séquences. Après la réalisation de ces séquences, une pause sera observée afin de permettre au participant de se lever et de se rafraîchir. Les séquences dynamiques seront ensuite répétées dans le but d'obtenir une précision accrue des mesures. Au total, 24 séquences dynamiques seront évaluées.



Manœuvre A



Manœuvre B

Mesures des potentiels moteurs évoqués par stimulation magnétique transcrânienne (SMT) (~ 1 heure)

Un examen des potentiels moteurs évoqués (une forme de mesure de l'activité musculaire) sera mesuré par SMT et effectué par un membre de l'équipe de recherche. Dans un premier temps, des électrodes de surface d'enregistrement (fils) seront collées sur les muscles de vos mains et vos bras et permettront d'enregistrer l'activité musculaire lorsque vous déplacez volontairement votre main.

Dans un deuxième temps, une bobine de SMT sera placée sur votre tête et de simples impulsions magnétiques seront utilisées pour stimuler la partie de votre cerveau qui contrôle les mouvements de votre main. Cette bobine sera maintenue en place par un membre de l'équipe de recherche. La stimulation produite par la bobine activera une petite partie de votre cerveau qui commande certains muscles de vos mains et vos bras. L'activité de ces muscles sera enregistrée par les mêmes électrodes utilisées précédemment. Vous sentirez probablement de petites secousses brèves dans les muscles de la main au cours de cette procédure, ce qui est normal (ce sont des réponses musculaires à la stimulation que nous mesurons). La stimulation magnétique est couramment utilisée dans la recherche et ne constitue pas un risque pour votre santé. Toutefois, si vous portez un pacemaker, tout métal implanté dans votre corps autre que les plombages dentaires, avez une maladie grave, prenez des antidépresseurs tricycliques ou médicaments anti-psychotiques, avez des antécédents personnels ou familiaux d'épilepsie, ou pourriez être enceinte, vous ne serez pas autorisés à participer à cette recherche. Il est essentiel que vous informiez un membre de l'équipe de recherche si l'une de ces situations s'applique à vous.



Image réutilisée avec permission illustrant une bobine de SMT appliquée au niveau de la tête

Mesures de l'activité musculaire par électromyographie (EMG) (~15 minutes)

Un nerf sera stimulé dans votre poignet afin de provoquer une contraction des muscles de la main. L'activité d'un des muscles stimulée sera enregistrée par les mêmes électrodes utilisées dans la mesure précédente.

◆ Intervention (~ ½ heure)

Les participants complèteront un programme de réadaptation quotidien de quatre séquences de mouvement impliquant le cou et le bras visant à « déplacer » le nerf médian de façon graduée (c.-à-d. mouvements du coude et du poignet de petite amplitude initialement, puis mouvements de plus grande amplitude impliquant tout le bras). Ce programme sera enseigné lors de l'évaluation initiale et une brochure informative comprenant des illustrations de chaque séquence sera distribuée. Les paramètres suivants devront être observés : 15 répétitions, 3 X par jour (~10 minutes/jour). Pour chaque participant, la tenue d'un journal de bord quotidien permettra de suivre l'évolution du programme de réadaptation. Un suivi téléphonique hebdomadaire sera assuré par un membre de l'équipe de recherche afin de prendre en compte les résultats du journal de bord et optimiser la réalisation du programme de réadaptation.

AVANTAGES PERSONNELS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

La réalisation du programme d'exercices pourrait avoir un impact positif sur les déficiences physiques (p.ex. : diminution de la douleur) et les incapacités fonctionnelles (p.ex. : amélioration de la participation au travail) au poignet et à la main. Toutefois, puisque ce programme d'exercices est expérimental, il est également possible que vous ne retiriez aucun avantage personnel en participant au présent projet de recherche. Par ailleurs, vous aurez contribué à l'avancement des connaissances nécessaires à l'amélioration des protocoles d'interventions thérapeutiques en réadaptation ciblant la population atteinte d'un STC.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

Les mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur prévus dans le présent projet sont initialement standardisés afin de permettre une comparaison adéquate entre chaque participant. Cependant, afin de minimiser les risques d'inconforts que certains de ces mouvements pourraient vous occasionner, le programme de réadaptation pourra être personnalisé pour chaque participant si nécessaire. L'ajustement des paramètres sera réalisé par un physiothérapeute lors des évaluations ou des suivis hebdomadaires. Il est possible que les exercices occasionnent des douleurs diffuses au bras ou au cou ou des sensations de picotements au bras ou à la main qui durent quelques minutes suivant le programme de réadaptation. Si ces douleurs ou sensations de picotements persistent davantage, vous devrez communiquer avec un membre de l'équipe de recherche et des modalités antalgiques seront fort probablement proposées (p.ex. : application de glace, prise de médicament sans ordonnance tel que les analgésiques).

L'évaluation par échographie permet de visualiser l'anatomie du poignet et de la main. Lors de vos visites, il est possible que l'évaluation révèle des particularités qui nécessitent l'opinion d'un médecin spécialiste. Si tel est le cas, l'évaluateur vous orientera vers un spécialiste afin qu'un examen complet soit réalisé pour établir un diagnostic précis et une stratégie pour une prise en charge rapide si nécessaire.

La pose d'électrodes peut nécessiter le rasage de poils sur les surfaces de peau où elles seront placées. À ce titre, les règles d'hygiène les plus strictes (rasoirs à usage unique, ruban hypo-allergène, nettoyage de la peau avec de l'alcool) seront mises en place. Par ailleurs, malgré l'application de ces mesures d'hygiène, il se pourrait que la peau où les électrodes sont placées soit irritée. Dans de tels cas, une lotion calmante sera appliquée sur votre peau. Lors de la stimulation, la bobine de SMT fait un clic sonore. Afin de prévenir tout inconfort, des bouchons pour les oreilles vous seront remis. Bien que nous utilisions des intensités faibles et une fréquence très basse (1 stimulation à chaque 5 secondes), il se peut que vous ressentiez un léger mal de tête qui s'estompera rapidement après quelques heures suivant l'évaluation ou qui pourra être soulagé par la prise de médicaments sans ordonnance tel que les analgésiques.

Nous considérons les risques découlant des procédures de SMT utilisées dans cette étude comme minimales pour la majorité des personnes. Cependant, il existe un risque de crise épileptique chez les personnes avec des antécédents personnels ou familiaux d'épilepsie ou qui sont à risque élevé de crise épileptique. Le chercheur veut minimiser les risques que courent les participants de cette étude. Par conséquent, vous ne devriez pas subir de STM si vous avez des antécédents personnels ou familiaux d'épilepsie. On vous posera des questions au sujet de vos antécédents médicaux ainsi que ceux de votre famille et vous serez exclus de l'étude si vous avez certaines affections médicales. Pour votre sécurité on vous demande de répondre à ces questions entièrement et avec précision.

INCONVÉNIENTS PERSONNELS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION

Les inconvénients reliés à votre participation à cette étude sont minimales. Nous sommes toutefois conscients que la durée des séances d'évaluation en laboratoire (~ 3 heures) peut entraîner une certaine fatigue. Dans ce cas, des pauses sont permises en tout temps sur demande. Le déplacement pour vous rendre au laboratoire pourrait représenter un inconvénient pour certaines personnes.

Pendant votre participation à cette étude, nous vous demandons également d'éviter d'initier d'autre(s) traitement(s) qui pourrai(en)t fausser les résultats de la présente étude. Dans l'éventualité où d'autre(s) traitement(s) s'offrirai(en)t à vous, vous êtes encouragé à en discuter avec un membre de l'équipe de recherche.

ACCÈS À VOTRE DOSSIER MÉDICAL

Vous acceptez que les personnes responsables de ce projet aient accès à votre dossier médical concernant les résultats au test d'électromyographie, préalable à

vosre participation, ou autres tests ou rapports médicaux relatifs à votre STC (p.ex. : résonance magnétique, radiographie simple, consultation en physiothérapie) précédant ou pendant la durée de la présente étude.

CONFIDENTIALITÉ

Il est entendu que les observations effectuées en ce qui vous concerne, dans le cadre du projet de recherche décrit ci-dessus, demeureront strictement confidentielles. À cet effet, tous les renseignements personnels et cliniques recueillis à votre sujet au cours de l'étude sur les différents formulaires seront codés de façon à ce qu'ils demeurent confidentiels et conservés sous clé dans une filière du Laboratoire de pathokinésiologie de l'Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal par le responsable de l'étude pendant une période de 5 ans suivant la fin du projet. Seuls les membres de l'équipe de recherche y auront accès. Cependant, à des fins de contrôle du projet de recherche, votre dossier pourrait être consulté par une personne mandatée par le Comité d'éthique de la recherche des établissements du CRIR ou par l'Unité de l'éthique du ministère de la Santé et des Services sociaux du Québec, qui adhère à une politique de stricte confidentialité. L'ensemble des renseignements personnels des participants sera détruit 5 ans après la fin du projet.

AUTORISATION D'UTILISER LES RÉSULTATS

Vous acceptez que l'information recueillie puisse être utilisée pour fins de communication scientifique, professionnelle et d'enseignement. Il est entendu que lors de la présentation des résultats de cette recherche, rien ne pourra permettre de vous identifier.

INFORMATIONS CONCERNANT LE PROJET ET PERSONNES RESSOURCES

On devra répondre, à votre satisfaction, à toute question que vous poserez à propos du projet de recherche. Pour toute information ou question, vous pourrez communiquer avec Dany Gagnon, pht, Ph.D. en sciences biomédicales (option réadaptation), responsable du projet, au numéro de téléphone [REDACTED] ou par courriel à l'adresse : dany.gagnon.2@umontreal.ca ou, s'il est absent, avec Philippe Paquette pht, M.Sc., coordonnateur du projet à l'Institut de Réadaptation Gingras-Lindsay de Montréal au [REDACTED] ou par courriel à l'adresse : philippe.paquette@umontreal.ca

Si vous avez des questions sur vos droits et recours ou sur votre participation à ce projet de recherche, vous pouvez communiquer avec Me Anik Nolet, coordonnatrice à l'éthique de la recherche des établissements du CRIR au [REDACTED] ou par courriel à l'adresse : anolet.crir@ssss.gouv.qc.ca. Pour ces mêmes questions, vous pouvez aussi communiquer avec le commissaire local aux plaintes de votre établissement.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET RETRAIT DE VOTRE PARTICIPATION

Il est entendu que votre participation au projet de recherche décrit ci-dessus est tout à fait libre et volontaire. Il est également entendu que vous avez le droit de

refuser d'y participer ou que vous pourrez, à tout moment, mettre un terme à votre participation sans aucun préjudice et sans que cela n'affecte les services de santé auxquels vous aurez droit à l'Institut de Réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal ou dans d'autres établissements. En cas de retrait de votre part, les données recueillies avant votre retrait seront conservées en format anonymisé à moins que vous ne nous demandiez de les détruire.

CLAUDE DE RESPONSABILITÉ

Il est entendu qu'en acceptant de participer à cette étude, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, les organismes subventionnaires et les institutions impliqués de leurs obligations légales et professionnelles.

INDEMNITÉ COMPENSATOIRE

Pour chaque séance d'évaluation prévue dans le présent projet de recherche, une indemnité compensatoire de 50,00\$ par séance vous sera remise afin de compenser les dépenses encourues par votre participation. Le stationnement à l'IRGLM sera gratuit pour les personnes choisissant de se rendre aux séances d'évaluation en automobile.

CONSENTEMENT

Je déclare avoir lu et compris le présent projet, la nature et l'ampleur de ma participation, ainsi que les risques auxquels je m'expose tels que présentés dans le présent formulaire. J'ai eu l'occasion de poser toutes les questions concernant les différents aspects de l'étude et de recevoir des réponses à ma satisfaction.

Je, soussigné(e), accepte volontairement de participer à cette étude. Je peux me retirer en tout temps sans préjudice d'aucune sorte. Je certifie qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision et je sais qu'une copie de ce formulaire figurera dans mon dossier médical.

- J'accepte d'être contacté (e) dans le futur par le même chercheur principal pour d'autres études dans un domaine de recherche connexe :

- ☐ non
☐ oui (pour une durée d'un an) *
☐ oui (pour une durée de deux ans) *
☐ oui (pour une durée de trois ans) *

* Notez que si vous cochez l'une de ces trois cases, vos coordonnées personnelles seront conservées par le chercheur principal pour la période à laquelle vous avez consenti.

- J'accepte que les données recueillies au cours de cette étude soient utilisées pour d'autres publications scientifiques demeurant en lien (domaine de recherche connexe) avec le présent projet.

Effets d'un programme de réadaptation à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques offert à des individus atteints du syndrome du tunnel carpien

oui ☐ non ☐

Une copie signée de ce formulaire d'information et de consentement doit m'être remise.

Nom du participant

Signature

Fait à Montréal, le _____, 201__.

ENGAGEMENT DU CHERCHEUR

Je, soussigné (e), _____, certifie

- (a) avoir expliqué au signataire les termes du présent formulaire;
- (b) avoir répondu aux questions qu'il m'a posées à cet égard;
- (c) lui avoir clairement indiqué qu'il reste, à tout moment, libre de mettre un terme à sa participation au projet de recherche décrit ci-dessus;
- (d) que je lui remettrai une copie signée et datée du présent formulaire.

Signature du responsable du projet ou de son représentant

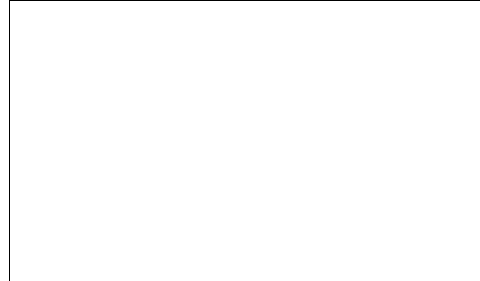
Fait à Montréal, le _____, 201__.



APPROUVÉ – CÉR DU CHUM

DATE : 28 mars 2016

INITIALES : MJB



FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Titre du projet:	Effets d'un programme de réadaptation préopératoire à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques offert à des individus ayant un syndrome du tunnel carpien en attente de chirurgie de décompression
Chercheur principal:	Dr Michel Alain Danino, MD, PhD. Professeur, département de chirurgie, faculté de médecine, Université de Montréal. Chef du département de chirurgie plastique et de réimplantation de la main du CHUM – hôpital Notre-Dame
Co-chercheurs:	Johanne Higgins, Erg, PhD. et Dany H. Gagnon, Pht, PhD. Professeurs, école de réadaptation, faculté de médecine, Université de Montréal Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal (IRGLM)
Chercheur-étudiant:	Philippe Paquette, Pht, MSc. Étudiant au doctorat en Sciences de la réadaptation, faculté de médecine, Université de Montréal. Centre de recherche interdisciplinaire en réadaptation du Montréal métropolitain (CRIR), site Institut de réadaptation Gingras-Lindsay-de-Montréal (IRGLM)
Financement:	Partenariat OPPQ-REPAR (Ordre professionnel de la physiothérapie du Québec et Réseau provincial en adaptation-réadaptation)
No de l'étude:	MP-02-2016-5999
No de l'étude au CÉR CHUM:	15.097

PRÉAMBULE

Nous sollicitons votre participation à un projet de recherche parce que vous souffrez du syndrome du tunnel carpien (STC) et que vous êtes en attente d'une première chirurgie de décompression du tunnel carpien. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet et de signer ce formulaire d'information et de consentement, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur responsable du projet ou aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

NATURE ET OBJECTIFS DU PROJET

Le syndrome du tunnel carpien est une des principales affections connues du poignet et de la main qui cause des déficiences physiques (par exemple: douleur, picotement, fourmillement, faiblesse de la main) pouvant limiter la capacité à réaliser les tâches de la vie quotidienne (par exemple: prendre ou manipuler des objets avec les mains) et la participation sociale (par exemple: absence au travail).

Chez les individus souffrant du STC, le nerf médian (le principal nerf voyageant à l'intérieur du canal carpien) est souvent affecté. Les physiothérapeutes recommandent souvent des exercices qui ont pour but de «déplacer» le nerf à l'intérieur du bras. Concrètement, ces exercices impliquent des mouvements du bras et du cou dans un ordre spécifique, dans le but d'améliorer le déplacement du nerf médian à l'intérieur de son environnement (c'est-à-dire favoriser la mobilité du nerf par rapport aux muscles, aux os et autres structures anatomiques du bras). Nous croyons que ces exercices de mobilisations «neurodynamiques» ont un effet favorable sur le nerf médian et pourront améliorer les déficiences et incapacités fonctionnelles au poignet et à la main chez les individus souffrant du STC.

L'objectif principal de cette étude vise à déterminer si les déficiences ainsi que les incapacités fonctionnelles au poignet et à la main seront améliorées chez les individus ayant un STC en attente d'une chirurgie de décompression qui complètent un programme de réadaptation fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques du nerf médian comparativement à ceux qui ne complètent aucun programme.

L'objectif secondaire de l'étude vise à déterminer si la récupération quatre semaines après une chirurgie de décompression du tunnel carpien est améliorée chez les individus ayant complété le programme de réadaptation préopératoire à domicile fondé sur des exercices de mobilisations neurodynamiques, comparativement à ceux n'ayant complété aucun programme de réadaptation préopératoire.

Afin de répondre à ces objectifs, cette étude impliquera:

- 1) la réalisation d'un programme expérimental d'exercices à domicile avec supervision indirecte par suivis téléphoniques à chaque semaine, pour une période de quatre semaines, comprenant des mouvements ciblés du bras et du cou.

- 2) la participation à deux séances d'évaluation permettant de mesurer des déficiences au poignet et à la main (impliquant notamment des questionnaires standardisés et des tests cliniques couramment utilisés pour l'évaluation du STC) et des mesures d'imagerie quantitative par échographie statique (telles que hauteur, largeur, aire transverse) et dynamique (tels que déplacement et déformation) du nerf médian permettant d'en caractériser l'atteinte.

Les chercheurs espèrent que cette étude contribuera à fournir des connaissances sur l'efficacité d'un programme de réadaptation fondé sur les exercices neurodynamiques ainsi que sur la pertinence d'instaurer un tel programme en phase préopératoire chez les individus atteints du STC en attente d'une chirurgie de décompression.

NOMBRE DE PARTICIPANTS ET DURÉE DE LA PARTICIPATION

30 patients du CHUM participeront à ce projet.

L'étude se déroulera sur un période approximative de deux ans. Il est attendu que la durée de la participation individuelle s'échelonne sur une période deux mois.

NATURE DE LA PARTICIPATION DEMANDÉE

Si vous acceptez de participer à l'étude, et après avoir signé le présent formulaire, vous serez assigné(e) au hasard au groupe expérimental ou au groupe contrôle par un processus de randomisation lors du recrutement. Vous aurez 50% de chances de vous retrouver dans l'un des deux groupes de l'étude suivants:

1- Groupe expérimental:

Les participants assignés au groupe expérimental complèteront un programme de réadaptation quotidien composé de quatre séquences de mouvement impliquant le cou et le bras visant à «déplacer» le nerf médian de façon graduée (mouvements du coude et du poignet de petite amplitude initialement, puis mouvements de plus grande amplitude impliquant tout le bras). Ce programme sera enseigné lors de l'évaluation initiale et une brochure informative comprenant des illustrations de chaque séquence sera distribuée. Les paramètres suivants devront être observés: 15 répétitions, 3 fois par jour (environ 10 minutes/jour). Pour chaque participant, la tenue d'un journal de bord quotidien permettra de suivre l'évolution du programme de réadaptation. Un suivi téléphonique hebdomadaire sera assuré par un membre de l'équipe de recherche afin de prendre en compte les résultats du journal de bord et optimiser la réalisation du programme de réadaptation.

2- Groupe contrôle:

Les participants assignés au groupe contrôle ne complèteront aucun programme de réadaptation. Un suivi hebdomadaire sera réalisé afin que ceux-ci aient accès à un professionnel de la santé afin de pouvoir poser des questions relatives à leur condition, s'ils le désirent. À la fin de leur participation à l'étude, les participants de groupe contrôle se verront offrir la possibilité de compléter le programme de réadaptation et auront accès à toute l'information fournie au groupe expérimental.

DÉROULEMENT DU PROJET/PROCÉDURES

À la fin de ce formulaire, vous trouverez un tableau présentant les différents tests et procédures prévus tout au long des différentes étapes de l'étude.

Les visites prévues à l'étude auront lieu au département de physiothérapie (1^{er} étage pavillon Deschamps)– hôpital Notre-Dame du CHUM.

◆ Visite 1 initiale d'évaluation (environ 2 heures)

Au cours de cette visite, les procédures suivantes seront effectuées:

• Mesures des déficiences et incapacités fonctionnelles (environ 1 heure)

- Un examen clinique, effectué par un physiothérapeute, comprendra un questionnaire général (âge, taille, masse corporelle, condition de santé, etc.), ainsi que deux questionnaires visant à évaluer vos symptômes au poignet et à la main.
- Par la suite, un examen physique comprendra l'évaluation de la sensibilité, de la discrimination deux-points (c'est-à-dire, la capacité à différencier deux points de pression séparés d'une courte distance, environ 2-6 millimètres, sur la paume de la main et la pulpe des doigts) et de la force de chacune des mains, l'évaluation de l'amplitude des mouvements aux membres supérieurs (cou, épaule, coude, poignet), ainsi que la réalisation de tests spécifiques associés au STC (test de Tinell, test de Phalen, ULNT 1, ULNT 2M).

• Mesures du nerf médian par imagerie quantitative par échographie (environ 1 heure)

- Un examen d'imagerie par échographie, effectué par un membre de l'équipe de recherche, sera réalisé au niveau de votre poignet.
 - Vous serez installé(e) sur une table d'examen équipée d'un support pour la tête et de différents appuis pour les membres supérieurs.
 - Avant le début des différents mouvements ciblés de la tête et des membres supérieurs, des marques seront faites à l'aide d'un crayon à l'encre une fois le nerf médian identifié sur chacun de vos poignets qui seront évalués. Ces marques permettront de s'assurer que la sonde d'échographie demeure au même endroit durant l'expérience.
 - Pour permettre l'enregistrement d'images, un gel de conduction sera appliqué entre la peau et la sonde.
 - Ensuite, des images statiques et dynamiques permettront de mesurer la déformation et l'excursion du nerf médian lors de deux **manceuvres (A et B)** décrites ci-dessous. Tous les mouvements seront débutés à partir d'une position de base dans laquelle la main sera maintenue en position neutre (doigts étendus), le coude sera complètement étendu et l'épaule sera stabilisée, tournée vers l'extérieur (rotation externe) et éloignée du corps (abduction) afin de produire un angle de 45° entre le bras et le corps.

Manœuvre A: Mouvements de la tête et du poignet du côté opposé

Lors de ce test, le poignet sera maintenu vers le bas (extension) à 30°. La tête reposant sur un support sera déplacée de 30°, par un assistant, du côté opposé au poignet testé.



Manœuvre A

Manœuvre B: Mouvements du poignet et de la tête du même côté

Lors de ce test, la position sera identique au mouvement précédent, à l'exception du fait que la tête sera de 30°, par un assistant, du même côté que le poignet testé.



Manœuvre B

- Chaque séquence de mouvement sera répétée trois fois et effectuée aux deux bras. Une fois ces séquences complétées, l'évaluateur changera l'orientation de la sonde d'échographie au niveau de l'avant bras et reprendra les séquences de mouvements (3 manœuvres aux 2 bras, en effectuant 2 amplitudes articulaires à l'épaule = 12 séquences). Après la réalisation de ces séquences, une pause sera observée afin de permettre au participant de se lever et de se rafraîchir. Les séquences dynamiques seront ensuite répétées dans le but d'obtenir une précision accrue des mesures. Au total, 24 séquences dynamiques seront évaluées aux deux poignets.

◆ Visite 2 - suivant le programme d'exercice expérimental (environ 1 ½ heure)

Au cours de cette visite, les procédures suivantes seront effectuées:

- Vous devrez répondre à deux questionnaires visant à évaluer vos symptômes au poignet et à la main.
- Un examen physique, tel que décrit dans le cadre de la visite 1.
- Les mesures par échographie seront également répétées.

◆ Visite 3 - finale postopératoire (environ 1 ½ heure)

Au cours de cette visite, les procédures suivantes seront effectuées:

- Vous devrez répondre à deux questionnaires visant à évaluer vos symptômes au poignet et à la main.
 - Un examen physique, tel que décrit dans le cadre de la visite 1.
- Les mesures par

RISQUES ET INCONVÉNIENTS

Les mouvements ciblés de la tête et du membre supérieur prévus dans le présent projet seront initialement standardisés afin de permettre une comparaison adéquate entre chaque participant.

Cependant, afin de minimiser les risques d'inconforts que certains de ces mouvements pourraient vous occasionner, le programme de réadaptation pourra être personnalisé pour chaque participant si nécessaire. L'ajustement des paramètres sera réalisé par un physiothérapeute lors des évaluations ou des suivis hebdomadaires. Il est possible que les exercices occasionnent des douleurs diffuses au bras ou au cou ou des sensations de picotements au bras ou à la main qui durent quelques minutes suivant le programme de réadaptation.

Si ces douleurs ou sensations de picotements persistent davantage, des modalités antalgiques seront proposées par un membre de l'équipe de recherche (par exemple: application de glace, prise d'anti-inflammatoire non-stéroïdien en vente libre).

AVANTAGES

Il se peut que vous retiriez un bénéfice personnel de votre participation à ce projet de recherche, mais on ne peut vous l'assurer. À tout le moins, les résultats obtenus contribueront à l'avancement des connaissances dans ce domaine.

CONFIDENTIALITÉ

Avec votre permission, votre médecin traitant sera averti de votre participation à ce projet de recherche.

Durant votre participation à ce projet, le chercheur responsable ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires pour répondre aux objectifs scientifiques de ce projet seront recueillis.

Ces renseignements peuvent comprendre les informations contenues dans vos dossiers médicaux concernant votre état de santé passé et présent, vos habitudes de vie ainsi que les résultats de tous les tests, examens et procédures que vous aurez à subir durant ce projet. Votre dossier peut aussi comprendre d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance et votre origine ethnique.

Tous les renseignements recueillis demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité des renseignements, vous ne serez identifié(e) que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable.

Les chercheurs utiliseront les données à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet décrits dans le formulaire d'information et de consentement.

Également, les données du projet seront conservées pendant 5 ans après la fin de l'étude par le chercheur responsable. Elles pourraient également servir pour d'autres analyses de données reliées au projet ou pour l'élaboration de projets de recherches futurs.

Les données pourront être publiées dans des revues spécialisées ou faire l'objet de discussions scientifiques, mais il ne sera pas possible de vous identifier.

Un rapport scientifique des résultats de ce projet sera transmis à l'OPPQ-REPAR, toutefois il ne sera pas possible de vous identifier.

À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche ainsi que vos dossiers médicaux pourront être consultés par une personne mandatée par le comité d'éthique de la recherche du CHUM ou par l'établissement, par une personne mandatée par des organismes publics autorisés.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, vos noms et prénoms, vos coordonnées et la date de début et de fin de votre participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire à part maintenu par le chercheur responsable.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier les renseignements recueillis, et les faire rectifier au besoin, et ce, aussi longtemps que le chercheur responsable du projet ou l'établissement détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet, vous pourriez n'avoir accès à certaines de ces informations qu'une fois votre participation terminée.

COMMUNICATION DES RÉSULTATS GÉNÉRAUX

Vous pourrez connaître les résultats généraux de cette étude si vous en faites la demande au chercheur principal à la fin de l'étude. Si vous le désirez, on vous contactera par téléphone, courriel électronique ou lettre, à votre choix. Minimalement, tous les participants du groupe contrôle seront contactés par l'un de ces moyens afin d'avoir la possibilité de recevoir le programme d'exercices expérimental s'ils le désirent.

POSSIBILITÉ DE COMMERCIALISATION

Votre participation au projet de recherche pourrait mener à la création de produits commerciaux qui pourraient être éventuellement protégés par voie de brevet ou autres droits de propriété intellectuelle. Cependant, dans un tel cas, vous ne pourrez en retirer aucun avantage financier.

FINANCEMENT DU PROJET

Le chercheur responsable du projet et l'établissement ont reçu un financement du partenariat de l'Ordre professionnel de la physiothérapie du Québec (OPPQ) et du réseau provincial en adaptation-réadaptation (REPAR) pour mener à bien ce projet de recherche.

COMPENSATION

Vous ne recevrez aucune compensation monétaire pour votre participation à ce projet de recherche. Toutefois, vous recevrez une somme de 30.00\$ par séance complétée (visites 1, 2 et 3), afin de compenser les dépenses encourues par votre participation.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE ET DROITS DU SUJET DE RECHERCHE

Si vous deviez subir quelque préjudice que ce soit par suite de l'administration d'un médicament ou de toute autre procédure reliée à l'étude, vous recevrez tous les soins et services requis par votre état de santé, sans frais de votre part.

En acceptant de participer à cette étude, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, ou l'établissement de leurs responsabilités légales et professionnelles.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET POSSIBILITÉS DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître votre décision au chercheur responsable du projet ou à l'un des membres du personnel affecté au projet.

Votre décision de ne pas participer à ce projet de recherche ou de vous en retirer n'aura aucune conséquence sur la qualité des soins et des services auxquels vous avez droit ou sur votre relation avec le chercheur responsable du projet et les autres intervenants.

Le chercheur responsable du projet de recherche ou le comité d'éthique de la recherche du CHUM peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement, si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt, si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche ou s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous vous retirez ou êtes retiré(e) du projet, l'information déjà obtenue dans le cadre de ce projet sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour assurer votre sécurité et aussi celles des autres sujets de recherche et rencontrer les exigences réglementaires.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai verbalement et par écrit.

PERSONNES-RESSOURCES

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous éprouvez un problème que vous croyez relié à votre participation au projet de recherche, vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable du projet de recherche, Dr Michel Alain Danino, au [REDACTED] ou par courriel à l'adresse: alain.danino.chum@ssss.gouv.qc.ca ou avec le chercheur-étudiant, M. Philippe Paquette, au [REDACTED] ou par courriel à l'adresse: philippe.paquette@umontreal.ca ou avec M. Dany Gagnon, co-chercheur, au [REDACTED], ou par courriel à l'adresse: dany.gagnon.2@umontreal.ca

En tout autre temps (soir, nuit, fin de semaine et jour férié), en cas d'urgence, pour rapporter des effets secondaires ou toute lésion liée à la recherche, vous devrez vous présenter à l'urgence de l'Hôpital Notre-Dame du CHUM au besoin et vous serez vu(e) par le médecin de garde en chirurgie plastique. Vous devrez mentionner que vous participez à ce projet de recherche.

Pour toute question concernant vos droits en tant que sujet participant à ce projet de recherche, ou si vous avez des plaintes ou des commentaires à formuler, vous pouvez communiquer avec le commissaire local aux plaintes et à la qualité des services de l'Hôpital Notre-Dame du CHUM au [REDACTED].

SURVEILLANCE DES ASPECTS ÉTHIQUES

Le comité d'éthique de la recherche du CHUM a approuvé ce projet de recherche et en assure le suivi pour tous les centres participants au Québec. De plus, il approuvera au préalable toute révision et toute modification apportée au formulaire d'information et de consentement et au protocole de recherche.

CONSENTEMENT

Avant de signer et dater le présent formulaire de consentement, j'ai reçu des explications complètes sur les méthodes et les moyens qui seront utilisés pour administrer le traitement à l'étude ainsi que sur les désagréments, les risques et les effets indésirables qui pourraient y être associés.

J'ai lu et j'ai eu suffisamment de temps pour comprendre pleinement les renseignements présentés ci-dessus concernant cette étude. J'ai eu l'occasion de poser toutes mes questions et on y a répondu à ma satisfaction. Je suis libre de poser d'autres questions à n'importe quel moment. J'accepte de plein gré de signer ce formulaire de consentement. Je recevrai un exemplaire de ce formulaire après l'avoir signé et daté. Un exemplaire sera également déposé à mon dossier médical. En conséquence, je comprends que cette information sera disponible à toute personne à qui je donnerai accès à mon dossier médical. En apposant ma signature sur ce formulaire, je ne renonce cependant à aucun de mes droits légaux ni ne libère les chercheurs, l'hôpital et de leur responsabilité civile et professionnelle.

J'autorise le chercheur à informer mon médecin traitant de ma participation à ce projet:

Oui ☐

Non ☐

Nom et adresse du médecin traitant:

Nom et signature du sujet de recherche

Date

Signature de la personne qui a obtenu le consentement, si différente du chercheur responsable du projet de recherche

J'ai expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

Engagement du chercheur

Je certifie qu'on a expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche avait à cet égard et qu'on lui a clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à sa participation.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée et datée au sujet de recherche.

Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche	Date
--	------

SIGNATURE D'UN TÉMOIN

OUI ☐ NON ☐

La signature d'un témoin est requise pour les raisons suivantes:

- ☐ Difficulté ou incapacité à lire - La personne (témoin impartial) qui appose sa signature ci-dessous atteste qu'on a lu le formulaire de consentement et qu'on a expliqué précisément le projet au (à la) participant(e), qui semble l'avoir compris (se).
- ☐ Incompréhension de la langue du formulaire de consentement - La personne qui appose sa signature ci-dessous a fait fonction d'interprète pour le ou la participant(e) au cours du processus visant à obtenir le consentement

Nom (en lettres moulées)	Signature du témoin	Date
--------------------------	---------------------	------

Veillez noter:

Il faut consigner dans le dossier de recherche du (de la) participant(e), le cas échéant, d'autres renseignements sur l'aide fournie au cours du processus visant à obtenir le consentement.

Annexe: tableau des procédures

[illegible]

Annexe III : Résultats complémentaires du projet #4

Certains résultats n'ont pu être inclus dans la version finale du manuscrit. Dans cette annexe, les résultats secondaires des mesures du seuil de sensibilité, de la discrimination deux-point et des tests de Tinel et Phalen sont rapportés. Pour simplifier l'interprétation de ces données, le tableau suivant présente un résumé des mesures à l'étude, des hypothèses de recherche et des principaux résultats.

Mesures de résultat	Hypothèse de recherche	Résultats
<ul style="list-style-type: none">• Seuil de sensibilité au touché au pouce• Discrimination deux-points au pouce• Signe de Tinel• Signe de Phalen	Il est attendu que les individus ayant complété le programme d'exercices démontreront des améliorations supérieures des déficiences sensorimotrices de la main immédiatement après avoir complété le programme (T1) et à quatre semaines suivant la chirurgie (T2) comparativement à des individus n'ayant complété aucun exercice	<ul style="list-style-type: none">• Le programme d'exercices proposé n'induit pas d'amélioration supérieure de la sensibilité et de la discrimination deux-points au pouce• Une augmentation du pourcentage de signe de Phalen négatif est observé pour le groupe contrôle

Analyse du seuil de sensibilité au touché du pouce

Le test exact de Fisher a été utilisé pour déterminer si deux distributions de probabilité multinomiales sont égales dans la population participante (expérimental ou contrôle) pour une durée expérimentale donnée. La variable dépendante est l'appréciation de la sensibilité à l'aide de monofilaments de Semmes-Weinstein sur une échelle catégorielle (normal, diminution du touché léger, diminution de sensation de protection). L'hypothèse nulle est que les proportions de participants classés en fonction de leurs seuils de sensibilité dans le groupe expérimental seront égales aux proportions dans le groupe contrôle. L'hypothèse de recherche est que le pourcentage de sensibilité classée normale sera supérieur dans le groupe expérimental avec un seuil statistique significatif fixé à $p < 0,05$.

Résultats : Les deux distributions de probabilité multinomiales sont similaires entre les deux groupes lors de l'évaluation initiale (T0; $p=0,75$), l'évaluation après quatre semaines (T1; $p=0,46$), et l'évaluation quatre semaines après la chirurgie (T2; $p>0,99$), (voir tableau XIV).

Tableau XIV. Seuil de sensibilité au pouce

		Groupe		Total	<i>p</i>
		Ctrl	Exp		
Évaluation à T0					
Sensation de protection diminuée		4 (26,70%)	3 (20,00%)	7 (23,30%)	
Diminution du touché léger	Nombre de participants (%)	9 (60,00%)	11 (73,30%)	20 (66,70%)	0,75
Normal		2 (13,30%)	1 (6,70%)	3 (10,00%)	
Total		15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	
Évaluation à T1					
Sensation de protection diminuée		7 (46,70%)	5 (33,30%)	12 (40,00%)	
Diminution du touché léger	Nombre de participants (%)	8 (53,30%)	10 (66,70%)	18 (60,00%)	0,46
Normal		0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
Total		15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	
Évaluation à T2					
Sensation de protection diminuée		1 (6,70%)	1 (6,70%)	2 (6,70%)	
Diminution du touché léger	Nombre de participants (%)	11 (73,30%)	11 (73,30%)	22 (73,30%)	0,99
Normal		3 (20,00%)	3 (20,00%)	6 (20,00%)	
Total		15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	

Ctrl = contrôle, Exp = expérimental

Analyse de la discrimination deux-points du pouce

Le test exact de Fisher a été utilisé pour déterminer si deux distributions de probabilité multinomiales sont égales dans la population participante (expérimental ou contrôle) pour une durée expérimentale donnée. La variable dépendante est l'appréciation de la discrimination deux-points sur une échelle catégorielle (normal, juste, faible). L'hypothèse nulle est que les proportions de participants classés en fonction de leurs seuils de sensibilité dans le groupe expérimental seront égales aux proportions dans le groupe contrôle. L'hypothèse de recherche est que le pourcentage de sensibilité classée normale sera supérieur dans le groupe expérimental avec un seuil statistique significatif fixé à $p < 0,05$.

Résultats : Les deux distributions de probabilité multinomiales sont similaires entre les deux groupes lors de l'évaluation initiale (T0; $p=0,48$), l'évaluation après quatre semaines (T1; $p=0,33$), et l'évaluation quatre semaines après la chirurgie (T2; $p>0,99$), (voir tableau XV).

Tableau XV. Discrimination deux-points du pouce

			Groupe		Total	<i>p</i>
			Ctrl	Exp		
Évaluation à T0						
Faible	Nombre de participants (%)		0 (0%)	1 (6,70%)	1 (3,30%)	0,48
Juste			0 (0%)	1 (6,70%)	1 (3,30%)	
Normal			15 (100%)	13 (86,70%)	28 (93,30%)	
Total			15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	
Évaluation à T1						
Faible	Nombre de participants (%)		0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0,33
Juste			1 (6,70%)	4 (27,60%)	5 (16,70%)	
Normal			14 (93,30%)	11 (73,30%)	25 (83,30%)	
Total			15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	
Évaluation à T2						

Faible		0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	
Juste	Nombre de participants (%)	1 (6,70%)	1 (6,70%)	2 (6,70%)	0,99
Normal		14 (93,30%)	14 (93,30%)	28 (93,30%)	
Total		15 (100%)	15 (100%)	30 (100%)	

Ctrl = contrôle, Exp = expérimental

Analyse du signe de Tinel et Phalen

Le test Q de Cochran a été exécuté pour déterminer si le pourcentage de tests de Tinel ou de Phalen négatif était différent aux différents temps d'évaluation de l'étude pour chaque groupe (expérimental et contrôle séparément). La taille de l'échantillon n'étant pas adéquate pour utiliser l'approximation de la distribution du khi-deux, une distribution exacte a donc été calculée.

Résultats du test de Tinel pour le groupe expérimental: À l'évaluation initiale (T0), 33,3% des participants avaient un Tinel négatif, ce pourcentage a augmenté à 53,3% après quatre semaines (T1) et à 73,3% quatre semaines après la chirurgie (T2). Le pourcentage de Tinel négatif est similaire entre les différents temps d'évaluation, khi-deux (2) = 4,909, $p = 0,086$.

Test de Tinel	T0	T1	T2	<i>p</i>
Groupe expérimental				
Négatif (nombre de participants)	5	8	11	
Positif (nombre de participants)	10	7	4	
Total	15	15	15	0,09
Pourcentage de Négatif (%)	33,3	53,3	73,3	

Résultats du test de Tinel pour le groupe contrôle: À l'évaluation initiale (T0), 66,7% des participants avaient un Tinel négatif, ce pourcentage a diminué à 46,7% après quatre semaines (T1) et a augmenté à 66,7% quatre semaines après la chirurgie (T2). Le pourcentage de Tinel négatif est similaire entre les différents temps d'évaluation, khi-deux (2) = 2,571, $p = 0,438$.

Test de Tinel	T0	T1	T2	<i>p</i>
Contrôle				
Négatif (nombre de participants)	10	7	10	0,44
Positif (nombre de participants)	5	8	5	
Total	15	15	15	
Pourcentage de Négatif (%)	66,7	46,7	66,7	

Résultats du test de Phalen pour le groupe expérimentale: À l'évaluation initiale (T0), 20,0% des participants avaient un Phalen négatif, ce pourcentage a augmenté à 26,7% après quatre semaines (T1) et a augmenté à 53,3% quatre semaines après la chirurgie (T2). Le pourcentage de Phalen négatif est similaire entre les différents temps d'évaluation, khi-deux (2) = 4,667, $p = .097$.

Test de Phalen	T0	T1	T2	<i>p</i>
Expérimental				
Négatif (nombre de participants)	3	4	8	0,10
Positif (nombre de participants)	12	11	7	
Total	15	15	15	
Pourcentage de Négatif (%)	20,0	26,7	53,3	

Résultats du test de Phalen pour le groupe contrôle: À l'évaluation initiale (T0) et après quatre semaines (T1), 26,7% des participants avaient un Phalen négatif, ce pourcentage a augmenté à 80,0% quatre semaines après la chirurgie (T2). Le pourcentage de Phalen négatif est statistiquement différent entre les différents temps d'évaluation, khi-deux (2) = 10,667, $p =$

0,005. Des comparaisons multiples ont été effectuées en utilisant la procédure de Dunn avec une correction de Bonferroni. Il y avait une augmentation statistiquement significative du pourcentage de Phalen négatif entre T0 et T2 ($p = 0,014$ ajusté) et entre T1 et T2 (p ajusté = 0,014), alors qu'il n'existait aucune différence statistiquement significative entre T0 et T1 ($p > 0,99$)

Test de Phalen	T0	T1	T2	<i>p</i>
Contrôle				
Négatif (nombre de participants)	4	4	12	0,01
Positif (nombre de participants)	11	11	3	
Total	15	15	15	
Pourcentage de Négatif (%)	26,7	26,7	80,0	

Annexe IV : Fondements mathématiques des mesures extraites par imagerie quantitative par ultrasonographie

Mathematical formulas of first-order and second-order statistics to quantify gray-scale intensity.

First-order statistics	Mathematical formulas
Mean (\bar{x})	$\bar{x} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \frac{I(x, y)}{M \times N}$
Variance (σ^2)	$\sigma^2 = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{I(x, y) - \bar{x}\}^2}{M \times N}$
Skewness (S_k)	$S_k = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{I(x, y) - \bar{x}\}^3}{\sigma^3}$
Kurtosis (K_t)	$K_t = \frac{1}{M \times N} \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \{I(x, y) - \bar{x}\}^4}{\sigma^4}$
Entropy (E)	$E = - \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} p(i, j) \log_2(p(i, j))$
Second-order statistics	Mathematical formulas
Contrast (I_{con})	$I_{con} = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=1}^{255} i - j ^2 p(i, j)$
Angular Second Moment (I_{asm})	$I_{asm} = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} p(i, j)^2$
Homogeneity (I_{hmg})	$I_{hmg} = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} \frac{1}{1 + (i - j)^2} p(i, j)$

$I(x, y)$ denotes the gray-scale intensity at the x,y coordinates in a Region of interest. $p(i, j)$ represent the element of a gray level co-occurrence matrix and denotes the probability that gray-scale intensities i and j are adjacent.